

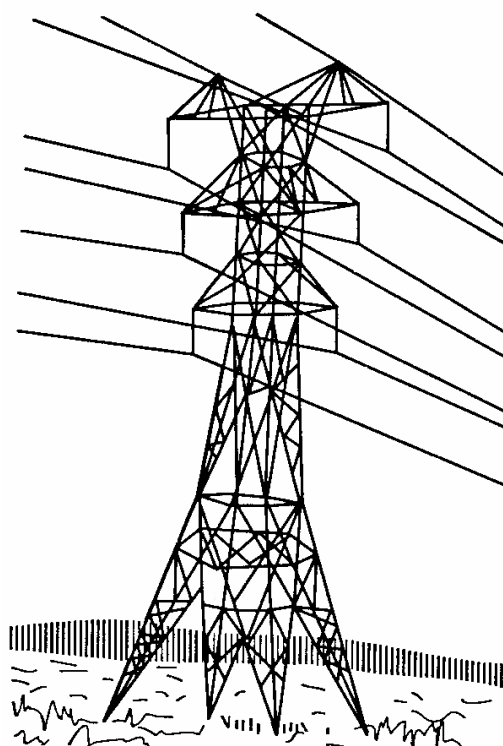
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять
з курсу

ВСТУП ДО СПЕЦІАЛЬНОСТІ

*(для студентів 1 курсу денної форми навчання за напрямом
підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології)*



Методичні вказівки до практичних занять з курсу «Вступ до спеціальності» (для студентів 1 курсу денної форми навчання за напрямом підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад.: В. М. Гаряжа, Г. В. Капустін. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015.– 44 с.

Укладачі: В. М. Гаряжа
Г. В. Капустін

Рецензент: доц., к. т. н. Є. Д. Дьяков

Рекомендовано кафедрою "Електропостачання міст",
протокол № 2 від 08. 10 2014 р.

ВСТУП

Дисципліна «Вступ до спеціальності» в загальному вигляді включає такі курси, як «Теоретичні основи електротехніки», «Електричні матеріали», «Електричні машини», «Електричні апарати», «Електропривод» та ряд інших і знайомить студентів з історією розвитку і сучасними проблемами електротехніки, історією кафедри і становленням спеціальності, методикою розрахунку нескладних електричних кіл постійного і змінного струмів, основами теорії електричних машин і апаратів, процесами виробництва і споживання електроенергії, розрахунком електричних мереж і їх конструкцією, вибором окремих захисних апаратів, розрахунком електричних навантажень і основами техніки безпеки при роботі з електроустановками.

Програмою передбачені практичні заняття, тематика яких охоплює найважливіші питання курсу і дозволяє закріпити в студентів знання та сформувати вміння їх застосування на практиці.

Дані методичні вказівки направлені на полегшення роботи студентів на аудиторних практичних заняттях і самостійного виконання задач.

Практичне заняття 1

Тема: З'єднання приймачів електроенергії.

Теоретичні відомості

В електричних схемах часто мають справу з послідовним, паралельним і змішаним з'єднанням резисторів. Струм I і сумарний еквівалентний опір R при різних способах з'єднання резисторів визначають в такий спосіб:

послідовне з'єднання (рис. 1.1)

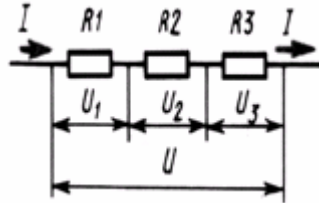


Рисунок 1.1 –Послідовне з'єднання резисторів

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{U}{R}; \quad (1.1)$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3; \quad (1.2)$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3. \quad (1.3)$$

паралельне з'єднання (рис. 1.2)

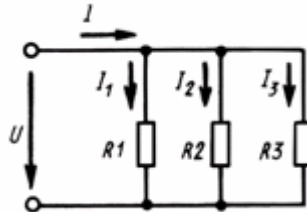


Рисунок 1.2 – Паралельне з'єднання резисторів

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) = \frac{U}{R}; \quad (1.4)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}, \quad (1.5)$$

$$\text{або } g = g_1 + g_2 + g_3. \quad (1.6)$$

де $g = \frac{1}{R}$ провідність кола, Сим.

В окремому випадку паралельного з'єднання двох резисторів R_1 і R_2 :

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (1.7)$$

При змішаному з'єднанні (рис. 1.3) визначення еквівалентного опору кола виконують поетапно.

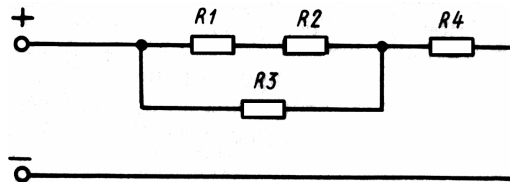


Рисунок 1.3 – Змішане з'єднання резисторів

Наприклад, у наведеній схемі спочатку визначається опір R_{12} послідовно включених резисторів R_1 і R_2 :

$$R_{12} = R_1 + R_2,$$

потім еквівалентний опір паралельно з'єднаних резисторів з опором R_{12} і R_3 :

$$R_{123} = \frac{R_{12} R_3}{R_{12} + R_3}.$$

Після цього визначається загальний опір усього кола:

$$R = R_{123} + R_4.$$

Аналогічно поступають і при розрахунку більш складних схем зі змішаним з'єднанням резисторів.

Приклади розв'язання задач

Приклад 1.1. Розрахувати загальний опір кола зображеного на рисунку 1.4 при $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 20 \text{ Ом}$, $R_3 = 30 \text{ Ом}$, $R_4 = 40 \text{ Ом}$, $R_5 = 50 \text{ Ом}$, $R_6 = 60 \text{ Ом}$.

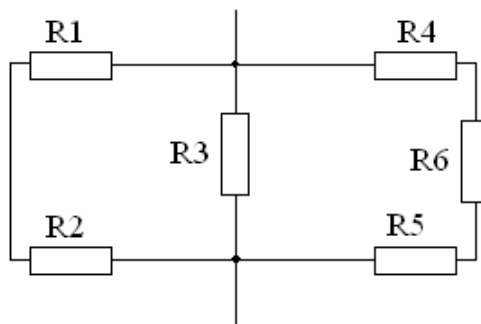


Рисунок 1.4 – Схема кола до прикладу 1

Рішення: Загальний опір резисторів R_1 і R_2 , які з'єднані між собою послідовно:

$$R_{1,2} = R_1 + R_2 = 10 + 20 = 30 \text{ Ом}.$$

Після цього схема матиме вигляд зображений на рисунку 1.5.

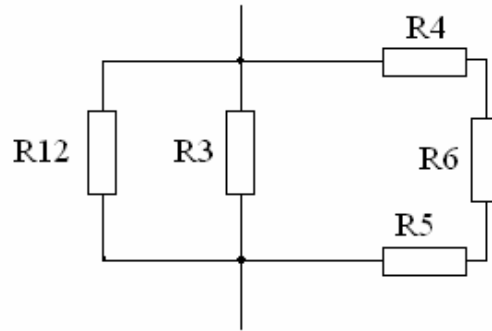


Рисунок 1.5 – Схема кола спрощена

Спростивши праве плече схеми, де опори R_4 , R_5 , R_6 з'єднані теж послідовно, одержимо $R_{4,5,6} = R_4 + R_5 + R_6 = 40 + 50 + 60 = 150 \text{ Ом}$.

Загальний опір трьох паралельно з'єднаних опорів знайдемо за формулою (1.5) $g = 1/30 + 1/30 + 1/150 = 0,033 + 0,033 + 0,0067 = 0,073 \text{ (1/Ом)}$. Відповідно $R = 1/0,073 = 13,69 \text{ Ом}$. Обчислити загальний опір опорів $R_{1,2}$ і R_3 можливо також за формулою 1.7. Результат 15 Ом . Перевірте самі. Цей опір після спрощення буде включений паралельно з опором $R_{4,5,6}$. За цією же формулою знаходимо: $R = 15 \times 150 / (150 + 15) = 13,64 \text{ Ом}$. Результати практично співпадають.

Приклад 1.2. 8 опорів величиною 10 Ом необхідно з'єднати так, щоб загальний опір склав 20 Ом .

Рішення: Є два варіанти виконання - або з'єднати два опори по 40 Ом паралельно й тоді їхній загальний опір буде дорівнює половині кожного відповідно до формули, або зробити ланцюжок із чотирьох послідовно з'єднаних опорів по 5 Ом , кожний з яких буде складатися з 2-х паралельно з'єднаних опорів по 10 Ом . Схема першого варіанту виконання показана на рисунку 1.6,а, другий на рисунку 1.6,б.

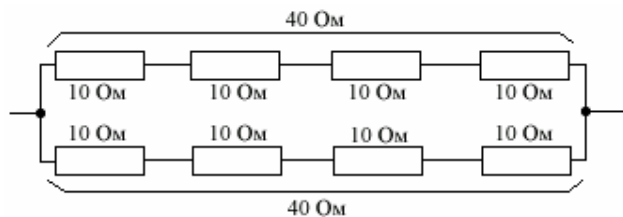


Рисунок 1.6,а – Схема з'єднання варіант 1

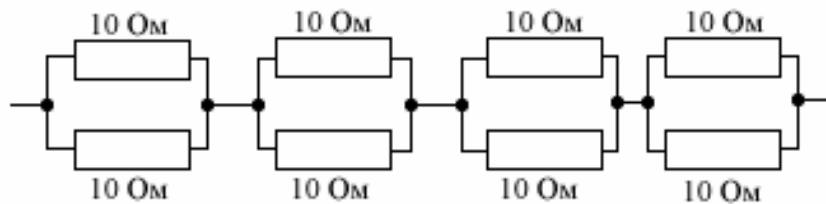


Рисунок 1.6,б – Схема з'єднання варіант 1

Задачі для самостійного розв'язання

Задача 1.1 Визначити опір кіл, зображених на рисунках 1.7,а, б, в, г. Спочатку привести рішення в загальному вигляді, а потім в цифровому.

Варіанти приймаються згідно з порядковим номером в списку групи.

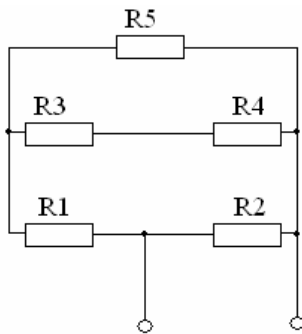


Рисунок 1.7,а

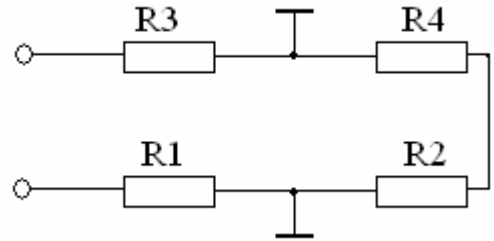


Рисунок 1.7,б

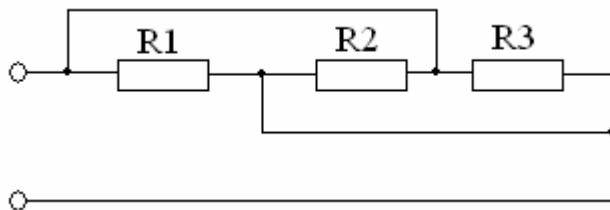


Рисунок 1.7, в

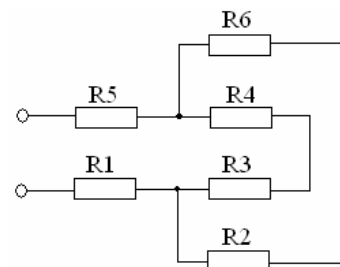


Рисунок 1.7, г

Варіанти задач

Варіант	Рисунок	R1, Ом	R2, Ом	R3, Ом	R4, Ом	R5, Ом	R6, Ом
1	7,а	60	60	60	60	120	—
2	7,б	10	20	30	40	—	—
3	7,в	120	120	120	—	—	—
4	7,г	5	30	25	15	35	10
5	7,а	10	50	40	40	80	—
6	7,б	30	25	15	35	—	—
7	7,в	80	80	40	—	—	—
8	7,г	10	16	5	25	7	14
9	7,а	30	80	40	60	100	—
10	7,б	60	50	30	30	—	—
11	7,в	140	140	70	—	—	—
12	7,г	15	45	25	35	20	15
13	7,а	30	80	40	60	100	—
14	7,б	15	50	20	30	40	50
15	7,в	100	100	50	—	—	—
16	7,г	25	100	60	50	20	10
17	7,а	60	60	60	60	120	—
18	7,б	10	20	30	40	—	—
19	7,в	120	120	120	—	—	—
20	7,г	5	30	25	15	35	10
21	7,а	10	50	40	40	80	—
22	7,б	30	25	15	35	—	—
23	7,в	80	80	40	—	—	—
24	7,г	10	16	5	25	7	14
25	7,а	10	30	12	18	40	—

Практичне заняття 2

Тема: Електричні кола з одним джерелом живлення.

Теоретичні відомості

При розрахунку простих кіл з одним джерелом живлення найчастіше використовується закон Ома, який встановлює залежність між напругою і струмом.

Стосовно ділянки кола (в якому відсутні джерела струму) закон формулюється таким чином: **струм на ділянці електричного кола дорівнює напрузі на затискачах цієї ділянки, поділеній на її опір:**

$$I = \frac{U}{R}. \quad (2.1)$$

Співвідношення між ЕРС, опором і струмом у замкнутому колі відповідно до закону Ома виражається формулою

$$I = \frac{E}{R + R_0}, \quad (2.2)$$

де R – опір зовнішньої частини кола; R_0 – внутрішній опір джерела.

Електрична енергія і потужність. Для переносу заряду q ділянкою кола з напругою U на його кінцях витрачається енергія W :

$$W = qU. \quad (2.3)$$

Потужність P – це витрата енергії в одиницю часу:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{q}{t} U = IU. \quad (2.4)$$

З врахуванням закону Ома можна одержати інші вирази для потужності електричного струму на ділянці кола з опором R :

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (2.5)$$

При використанні основних одиниць (кулон, ампер, вольт, ом, секунда) потужність виражається у *ватах*, енергія – у *джоулях*. В енергетиці користуються значно більшими величинами – кіловатами [кВт], мегаватами [МВт], кіловат – годинами [кВт – год.], мегават – годинами [МВт – год].

Приклади розв'язання задач

Приклад 2.1 Визначити загальний опір електричного кола, напругу й потужність кожного опору (рис. 2.1) при $R_1 = 10\text{Ом}$, $R_2 = 25\text{Ом}$, $R_3 = 15\text{Ом}$ і $R_4 = 14\text{ Ом}$. Напруга джерела напруги $U = 16\text{В}$. Внутрішнім опором джерела нехтувати.

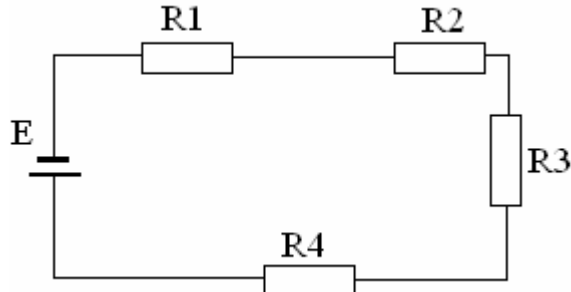


Рисунок 2.1 – Схема до прикладу 2.1

Рішення: Дане електричне коло є колом з послідовно ввімкненими опорами. Загальний опір в цьому випадку розраховується за формулою

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4.$$

Одержимо $R = 10 + 25 + 15 + 14 = 64\text{ Ом}$.

При послідовному ввімкненні струм однаковий у всьому колі й обчислюється як $I = U/R$, тому маємо:

$$I = 16/64 = 0,25\text{ А}.$$

Згідно з законом Ома для ділянки кола напруги на кожному із провідників складуть:

$$U_1 = I \times R_1, U_2 = I \times R_2, U_3 = I \times R_3, U_4 = I \times R_4.$$

Тоді: $U_1 = 0,25 \times 10 = 2,5\text{В}$; $U_2 = 0,25 \times 25 = 6,25\text{В}$; $U_3 = 0,25 \times 15 = 3,75\text{В}$; $U_4 = 0,25 \times 14 = 3,5\text{ В}$.

Перевіряємо: $U = 2,5 + 6,25 + 3,75 + 3,5 = 16\text{ В}$.

Потужність кожного елемента розраховується за формулою $P = U \times I$. Одержимо: $P_1 = U_1 \times I = 2,5 \times 0,25 = 0,625\text{ Вт}$; $P_2 = U_2 \times I = 6,25 \times 0,25 = 1,5625\text{ Вт}$; $P_3 = U_3 \times I = 3,75 \times 0,25 = 0,9375\text{ Вт}$;

$$P_4 = U_4 \times I = 3,5 \times 0,25 = 0,875\text{ Вт}.$$

Правильність рішення можна перевірити, розрахувавши баланс потужності для всього кола. Повинна виконатися умова:

$$U_1 \times I + U_2 \times I + U_3 \times I + U_4 \times I = U \times I.$$

Перевіряємо:

$$0,625\text{ Вт} + 1,5625\text{ Вт} + 0,9375\text{ Вт} + 0,875\text{ Вт} = 64\text{ В} \times 0,25\text{ А}.$$

Розрахунок виконаний вірно.

Приклад 2.2 У домашню розетку через подовжувач ввімкнений холодильник потужністю 300 Вт, пральна машина потужністю 2,5 кВт і мікрохвильова піч потужністю 1,5 кВт. Визначити загальний струм у колі й струм кожного зі споживачів.

Рішення: Електрична схема ввімкнення споживачів представлена на рисунку 2.2 і є схемою з паралельним з'єднанням споживачів.

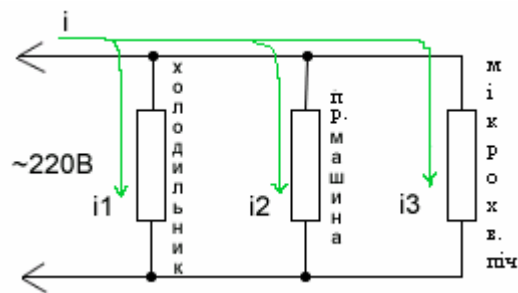


Рисунок 2.2 – Схема до прикладу 2.2

Струми приладів розрахуємо за формулою визначення потужності:

$$P = U \times I \text{ звідки } I = P/U.$$

Знаходимо $I_1 = P_{\text{хол}}/U = 300/220 = 1,36(\text{A})$; $I_2 = P_{\text{пр.м}}/U = 2500/220 = 11,369(\text{A})$; $I_3 = P_{\text{мкр.хв}}/U = 1500/220 = 6,81(\text{A})$. Загальний струм дорівнює сумі всіх струмів. Знаходимо: $I = I_1 + I_2 + I_3 = 1,36 + 11,369 + 6,81 = 19,54(\text{A})$.

Правильність рішення можна перевірити, розрахувавши баланс потужності всього кола. З умови відомо, що загальна потужність дорівнює $P = 300 \text{ Вт} + 2500 \text{ Вт} + 1500 = 4300 \text{ Вт} = 4,3 \text{ кВт}$. Також потужність дорівнює добутку загального струму на напругу й складе: $P = U \times I = 220 \times 19,54 = 4300 \text{ Вт} = 4,3 \text{ кВт}$. Розрахунок виконаний вірно.

Приклад 2.3 Необхідно виготовити новорічну гірлянду з однакових лампочок напругою 3,5 В. Скільки ламп буде потрібно для цього?

Рішення: Лампи мають меншу напругу, ніж напруга мережі, тому їх необхідно з'єднати послідовно. Оскільки параметри ламп однакові, необхідно загальну напругу розділити на робочу напругу ламп. Одержимо: $N = 220/3,5 = 62,86$ (штук). Округляємо до цілого значення: $N = 63$ штуки. Схема з'єднання ламп наведена на рисунку 2.3.

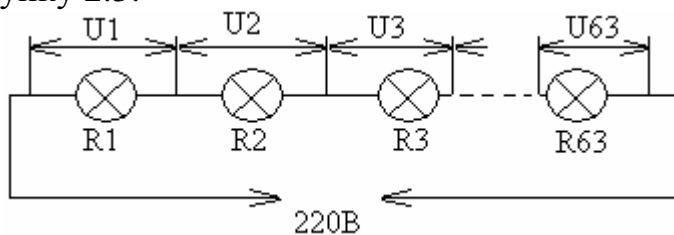


Рисунок 2.3 – Схема до прикладу 2.3

Задачі для самостійного розв'язання

Задача 2.1 Розрахувати напругу на кожній з ламп в схемі рисунок 2.3, але з врахуванням того, що одна лампа перегоріла і її замінили на лампу з параметрами $U = 3,5\text{В}$ і струмом $I = 0,26\text{А}$. Інші лампи на ту ж напругу, але робочий струм $I = 0,16\text{А}$. Розрахувати потужності цих двох типів лампочок, струм у колі після заміни ламп, напругу на одному і другому типі ламп.

Задача 2.2 Освітлення гаража було змонтоване з послідовно з'єднаних 20 ламп робочою напругою 12 В, потужністю 40 Вт кожна. Через якийсь час замінили 10 шт. з них на лампи з тією ж робочою напругою, але потужністю 60 Вт.

Після такої заміни лампи, потужністю 40 Вт стали перегоряти частіше. Чи могло так статися й чому, адже загальна кількість ламп не змінилася, а половина з них навіть потужніші?

Як би вплинула аналогічна заміна ламп при їх паралельному з'єднанні? Довести розрахунками.

Задача 2.3 На будинку встановлений щиток з лічильником. В холодний період лічильник потрібно підігрівати. Необхідно з резисторів потужністю 100 Вт, які є в наявності з номіналами 400 Ом і 620 Ом застосувати ті, які зможуть обігрівати щиток при подачі на них напруги 220В.

Практичне заняття 3

Тема: Розрахунок складних електричних кіл

Теоретичні відомості

Складні електричні кола. Складні електричні кола характеризуються наявністю гілок, вузлів, контурів.

Гілка – ділянка кола, уздовж якої проходить один і той самий струм і яка складається з послідовно з'єднаних елементів.

Вузол – місце з'єднання трьох і більш гілок.

Контур – будь-який замкнутий шлях кола, яким його можна обійти, рухаючись по гілках.

Наприклад, коло на рисунок 3.1 складається з п'яти гілок, трьох вузлів, шести контурів.

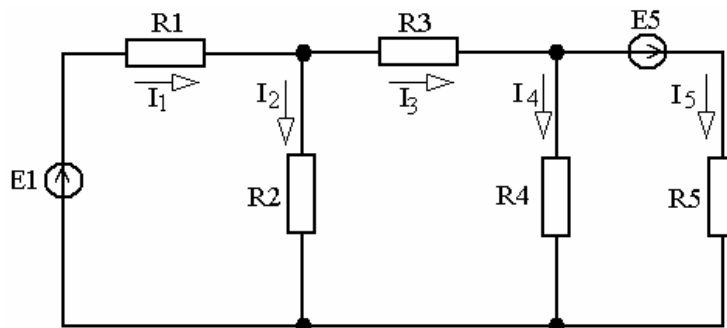


Рисунок 3.1 – Складне електричне коло

Розрахунки електричних кіл виконують за допомогою законів Кірхгофа. При цьому в більшості випадків приймачі електроенергії, ввімкнені в коло постійного струму, можна розглядати як резистори, що мають ті ж опори, що і реальні приймачі. У схемах резистори позначаються R1, R2, R3,

Відповідно до *першого закону Кірхгофа* сума струмів, спрямованих до вузла електричного кола, дорівнює сумі струмів, спрямованих від нього. Причому напрямки струмів до вузла вважається позитивним, від вузла – негативним. Наприклад, для вузла 2 на рисунку 3.1 можна записати:

$$I_3 = I_4 + I_5; \text{ для вузла 3: } I_2 + I_4 + I_5 = I_1.$$

Відповідно до *другого закону Кірхгофа* у будь-якому замкнутому електричному контурі алгебраїчна сума ЕРС дорівнює алгебраїчній сумі напруг на опорах, що входять у цей контур. При цьому значення ЕРС і напруг вважають позитивними, якщо напрямок ЕРС і струмів збігається з обраним напрямком обходу контуру.

При записі рівнянь за другим законом Кірхгофа необхідно:

- 1) задати умовні позитивні напрямки ЕРС, струмів і напруг;
- 2) вибрати напрямок обходу контуру, для якого записується рівняння;
- 3) записати рівняння, користуючись одним з формулювань, причому складові, що входять до рівняння, беруть із знаком «плюс», якщо їх умовні позитивні напрямки збігаються з напрямком обходу контуру й з знаком «мінус», якщо вони протилежні.

Наприклад, для зовнішнього контуру схеми на рисунку 11 можна записати:

$E_1 - E_5 = I_1 R_1 + I_5 R_5 + I_3 R_3$; для внутрішнього контуру: $0 = I_3 R_3 + I_4 R_4 - I_2 R_2$.

Розрахунок складних електричних кіл. Складні електричні кола з декількома контурами і різним розміщенням у них джерел і споживачів енергії в загальному випадку не можна звести до сполучення паралельно і послідовно з'єднаних резисторів.

Для розрахунку складних кіл використовують різні методи. Найбільш загальним є *метод складання і вирішення рівнянь за законами Кірхгофа*.

Перед складанням рівнянь довільно задають напрямок струмів у гілках, показавши їх на схемі стрілками.

Число необхідних рівнянь дорівнює числу невідомих струмів, причому число рівнянь за першим законом Кірхгофа повинне бути на одне менше числа вузлів кола. Інші рівняння складають за другим законом Кірхгофа, причому слід вибирати контури найбільш прості і такі, щоб у кожному з них була хоча б одна гілка, що не входить у раніше складені рівняння.

Розглянемо для прикладу схему, показану на рисунку 3.2.

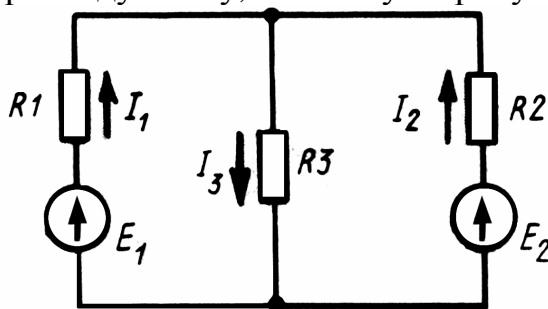


Рисунок 3.2 – До розрахунку складного кола

Для неї може бути складена система рівнянь

$$\begin{aligned} I_3 &= I_1 + I_2; \\ E_1 &= I_1 R_1 + I_3 R_3; \\ E_2 &= I_2 R_2 + I_3 R_3. \end{aligned}$$

Розв'язуючи цю систему рівнянь, можна визначити струми I_1 , I_2 , I_3 , якщо відомі E_1 , E_2 , R_1 , R_2 , R_3 .

Приклади розв'язання задач

Приклад 3.1. В електричному колі (рис. 3.3) визначити струми в гілках, напруги на всіх елементах кола, напругу U_{13} між вузлами 1 – 3, потужність джерел з ЕРС, якщо $E_1 = 12$ В, $E_2 = 13,5$ В, потужність приймача з опором R_3 , визначити режим роботи джерела E_1 . $R_{01} = 0,05$ Ом, $R_{02} = 0,1$ Ом, $R_3 = 2$ Ом, $R_4 = R_5 = 4$ Ом.

Рішення: У колі три вузли, п'ять гілок, значить, для визначення струмів у гілках необхідно скласти систему з п'яти рівнянь для невідомих струмів і розв'язати її.

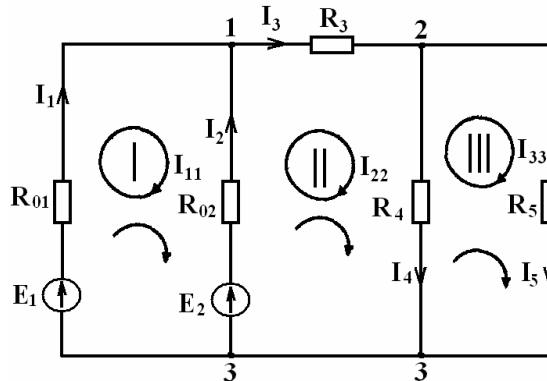


Рисунок 3.3 –Схема до прикладу 3.1

Як вказувалось вище, число рівнянь у системі, записаних за першим законом Кірхгофа, повинно дорівнювати двом, а інші три рівняння записують за другим законом Кірхгофа для незалежних контурів.

Для вузлів 1 і 2 і незалежних контурів I, II і III за вказаних умовних позитивних напрямках, ЕРС, струмів і напруг, а також при заданих напрямках обходу контурів система рівнянь має вигляд

$$\text{для вузла 1 } I_1 + I_2 - I_3 = 0,$$

$$\text{для вузла 2 } I_3 - I_4 - I_5 = 0,$$

$$\text{для контуру I } R_{01} = R_{02} = E_1 - E_2,$$

$$\text{для контуру II } R_{02} \times I_2 + R_3 \times I_3 + R_4 \times I_4 = E_2$$

$$\text{для контуру III } - R_4 \times I_4 + R_5 \times I_5 = 0.$$

Розв'язуючи систему рівнянь будь-яким способом, отримуємо

$$I_1 = 7,93 \text{ А; } I_2 = 11,03 \text{ А; } I_3 = 3,1 \text{ А; } I_4 = I_5 = 1,55 \text{ А.}$$

Як видно з результатів розрахунку, струм I_1 має від'ємне значення, що говорить про те, що дійсний напрямок струму в цій гілці протилежний умовно прийнятому.

Напруга на елементах електричного кола згідно з законом Ома

$$U_3 = R_3 \times I_3 = 2 \times 3,1 = 6,2 \text{ В;}$$

$$U_4 = R_4 \times I_4 = 4 \times 1,55 = 6,2 \text{ В;}$$

$$U_5 = R_5 \times I_5 = 4 \times 1,55 = 6,2 \text{ В.}$$

Напругу між вузлами 1 і 3 знаходимо, користуючись другим законом Кірхгофа. При обході контуру за годинниковою стрілкою маємо

$$E_2 = U_{02} + U_{13}; U_{13} = E_2 - U_{02} = E_2 - R_{02} \times I_2 = 13,5 - 0,1 \times 11 = 12,4 \text{ В.}$$

З електричної схеми видно, що напруга на затискачах джерел ЕРС E_1 і E_2 однакова й дорівнює U_{13} , тому що відносно вузлів 1 і 3 вони включені паралельно.

Потужність джерела ЕРС E_2 $P_2 = E_2 \times I_2 = 13,5 \times 11 = 148,5$ Вт

Потужність приймача $P_3 = R_3 \times I_3^2 = U_3 \times I_3 = 6,2 \times 3,1 = 19,2$ Вт.

В джерелі E_1 струм і ЕРС направлені зустрічно, що означає, що це джерело за вказаних в умові задачі параметрах кола, споживає електричну енергію. Така ситуація є звичайною в автомобілях, де джерело ЕРС E_1 – акумулятор, а джерело ЕРС E_2 , – генератор. При роботі двигуна автомобіля: $E > E_1$ і відбувається підзарядка акумулятора.

Рівняння балансу потужностей у даному випадку має вигляд

$$E_1 \times I_1 + E_2 \times I_2 = R_{01} \times I_1^2 + R_{02} \times I_2^2 + R_3 \times I_3^2 + R_4 \times I_4^2 + R_5 \times I_5^2$$

Оскільки джерело ЕРС E_2 працює в режимі споживання енергії і є електроприймачем, то рівняння балансу потужностей можна записати так

$$E_2 \times I_2 = E_1 \times I_1 + R_{01} \times I_1^2 + R_{02} \times I_2^2 + R_3 \times I_3^2 + R_4 \times I_4^2 + R_5 \times I_5^2$$

Після підстановки в цей вираз всіх параметрів, впевнімося, що потужність джерела електроенергії і сума потужностей всіх електроприймачів однакові

$$13,5 \times 11 = 12 \times 7,93 + 0,05 \times 7,93^2 + 0,1 \times 11,03^2 + 2 \times 3,1^2 + 4 \times 1,55^2 + 4 \times 1,55^2$$

$$148,5 \text{ Вт} \approx 148,9 \text{ Вт},$$

що практично співпадає і підтверджує правильність розрахунків.

Приклад 3.2 Користуючись методом контурних струмів визначити струми в гілках електричного кола (рис. 3.3) при значенні параметрів всіх елементів кола, вказаних у прикладі 3.1.

Рішення: В електричному колі три незалежних контури I, II і III. Напрямок контурних струмів задаємо такий, як показано на рисунку 3.3.

Система рівнянь для контурних струмів у даному випадку має вид

$$R_{11} \times I_{11} + R_{12} \times I_{22} + R_{13} \times I_{33} = E_{11}$$

$$R_{21} \times I_{11} + R_{22} \times I_{22} + R_{23} \times I_{33} = E_{22}$$

$$R_{31} \times I_{11} + R_{32} \times I_{22} + R_{33} \times I_{33} = E_{33},$$

де $E_{11} = E_1 - E_2$; $E_{22} = E_2$; $E_{33} = 0$;

$$R_{11} = R_{01} + R_{02}; R_{22} = R_{02} + R_3 + R_4; R_{33} = R_4 + R_5;$$

$$R_{12} = R_{21} = -R_{02}; R_{23} = R_{32} = -R_4; R_{13} = R_{31} = 0;$$

Опори і контурні ЕРС мають такі значення:

$$R_{11} = 0,05 + 0,1 = 0,15 \text{ Ом}; R_{22} = 0,1 + 2 + 4 = 6,1 \text{ Ом}; R_{33} = 4 + 4 = 8 \text{ Ом};$$

$$R_{12} = -0,1 \text{ Ом}; R_{13} = 0; R_{23} = -4 \text{ Ом};$$

$$E_{11} = 12 - 13,5 = -1,5 \text{ В}; E_{22} = 13,5 \text{ В}; E_{33} = 0;$$

Після розв'язання системи рівнянь, отримуємо

$$I_{11} = -7,93 \text{ А}; I_{22} = 3,1 \text{ А}; I_{33} = 1,55 \text{ А};$$

Струми в гілках знаходимо із співвідношень

$$I_1 = I_{11} = -7,93 \text{ А}; I_2 = I_{22} - I_{11} = 3,1 + 7,93 = 11,03 \text{ А}; I_3 = I_{22} = 3,1 \text{ А};$$

$$I_4 = I_{22} - I_{33} = 3,1 - 1,55 = 1,55 \text{ А}; I_5 = I_{33} = 1,55 \text{ А}$$

Задачі для самостійного розв'язання

Задача 3.1 Визначити струми в колі зображеному на рисунку 3.4. ЕРС джерел дорівнюють: $E_1 = 32$ В $E_5 = 120$ В; $E_2 = 10$ В. Внутрішній опір джерела E_1 становить $R_0 = 2$ Ом, внутрішніми опорами інших джерел нехтувати. Опори резисторів: $R_1 = 10$ Ом; $R_2 = 4$ Ом; $R_3 = 6$ Ом; $R_4 = 5$ Ом; $R_5 = 8$ Ом.

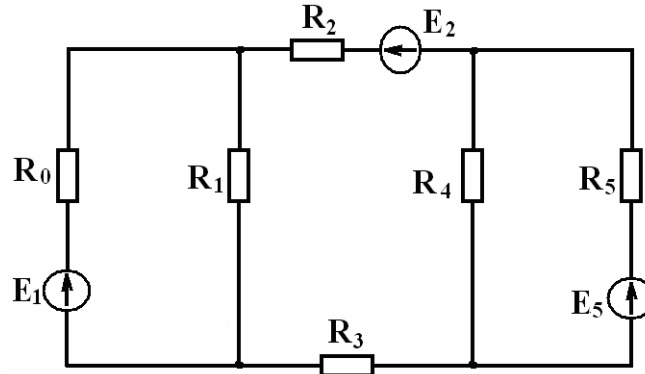


Рисунок 3.4 – Схема до задачі 3.1

Задачі для самостійного розв'язання

Задача 3.2 Визначити струми в колі зображеному на рисунку 3.5. ЕРС джерел дорівнюють: $E_1 = E_2 = 115$ В. Внутрішній опір джерела E_1 становить $R_{01} = 0,2$ Ом, джерела E_2 – $R_{02} = 0,4$ Ом. Опір резистора $R = 5$ Ом. Перевірити правильність визначення струмів складанням балансу потужностей.

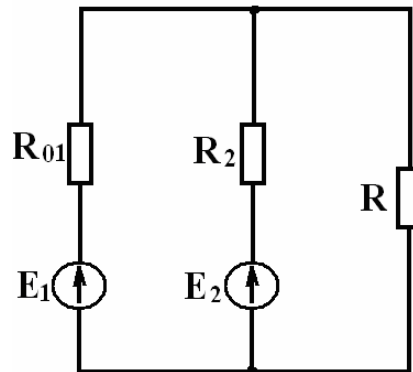


Рисунок 3.5 – Схема до задачі 3.2

Задача 3.3 Визначити струми в колі зображеному на рисунку 3.5. ЕРС джерел: $E_1 = 20$ В, $E_2 = 22$ В. Внутрішній опір джерел становить $R_{01} = R_{02} = 0,01$ Ом. Опір резистора $R = 0,1$ Ом. Перевірити правильність визначення струмів складанням балансу потужностей.

Задача 3.4 Визначити струми в колі зображеному на рисунку 3.6. ЕРС джерел: $E_1 = 100$ В, $E_2 = 120$ В, $E_3 = 150$ В. Опори резисторів $R_1 = 20$ Ом, $R_2 = 0$ Ом, $R_3 = 100$ Ом, $R = 60$ Ом. Перевірити правильність визначення струмів складанням балансу потужностей.

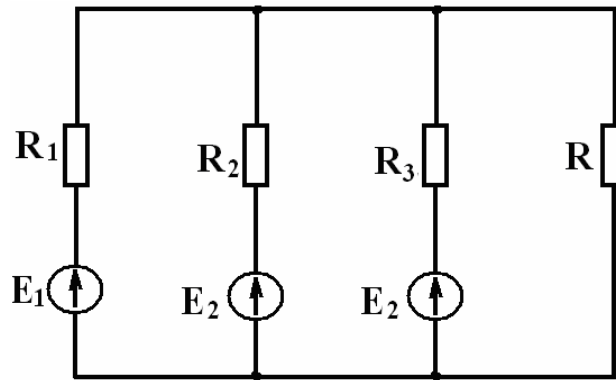


Рисунок 3.6 – Схема до задачі 3.4

Задача 3.5. Визначити струми в колі зображеному на рисунок 3.6. ЕРС джерел: $E_1 = 60$ В, $E_2 = 65$ В, $E_3 = 50$ В. Опори резисторів $R_1 = R_2 = 0,5$ Ом, $R_3 = 1$ Ом, $R = \infty$. Перевірити правильність визначення струмів складанням балансу потужностей.

Практичне заняття 4

Тема: Електричні кола змінного синусоїдального струму

Теоретичні відомості

У колах змінного струму розглядають струми, ЕРС і напруги, що періодично змінюють напрямок і значення. Зміни повторюються через деякий проміжок T , який називається *періодом*. Число періодів у секунду називається *частотою* f .

Широко використовується і дуже зручний для вивчення *синусоїдальний струм*.

На рисунку 4.1 наведене графічне зображення (часова діаграма) синусоїдального струму. Його миттєве значення описується формулою

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi), \quad (4.1)$$

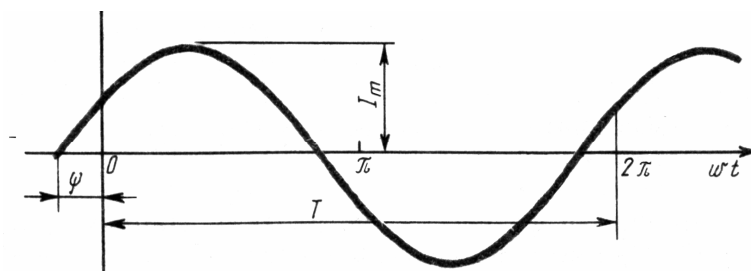


Рисунок 4.1 – Часова діаграма змінного струму

де I_m – максимальне значення (амплітуда) струму; $\omega = 2\pi/T = 2\pi/f$ – кутова частота; ψ – початкова фаза (значення аргументу в початковий момент часу, тобто при $t = 0$).

Період виражають у секундах [с], частоту – у герцах [Гц], фазу – у радіанах [рад] або градусах [град], кутову частоту – у радіанах на секунду [рад/с].

Усе сказане про синусоїдальний струм стосується також синусоїдальних ЕРС і напруги.

Діюче значення струму. Енергетична дія струму (теплова і здатність робити механічну роботу) характеризується його *діючим значенням*.

Між діючими й амплітудними значеннями синусоїдальних величин існують співвідношення:

$$I = I_m / \sqrt{2}; \quad U = U_m / \sqrt{2}; \quad E = E_m / \sqrt{2}. \quad (4.2)$$

На шкали амперметрів і вольтметрів змінного струму, як правило, наносять діючі значення струму і напруги.

Векторні діаграми. При розгляді багатьох питань, пов'язаних з колами синусоїдального струму, зокрема при їхніх розрахунках, зручно користуватися векторними діаграмами. Вони дозволяють зображувати синусоїдальні величини простіше, ніж за допомогою часових діаграм. Детально з використанням векторних діаграм можна познайомитися в [2].

Розрахунок кіл змінного струму. При розрахунках кіл змінного струму, так само як і кіл постійного струму, використовують закони Ома і Кірхгофа. Відмінність у застосуванні цих законів полягає в тому, що в колах змінного струму необхідно враховувати кути зсуву фаз між струмами і напругами.

Послідовне з'єднання. Розглянемо загальний випадок послідовного з'єднання резистора, котушки індуктивності і конденсатора (рис. 4.2, а).

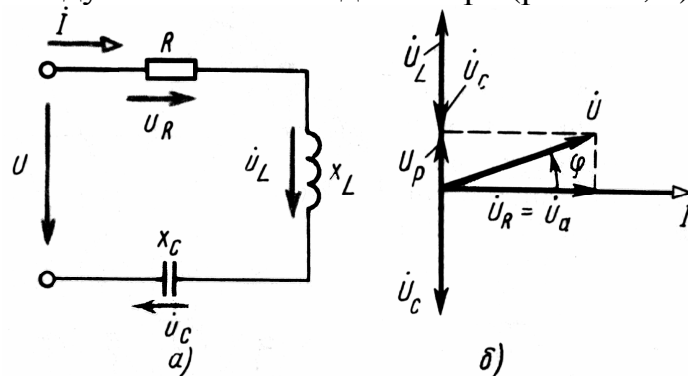


Рисунок 4.2 – Схема електричного кола з послідовним з'єднанням активного, індуктивного і ємнісного опору та векторна діаграма для його розрахунку

Для спадів напруги на окремих елементах можна записати: $U_R = IR$, $U_L = IX_L$; $U_C = IX_C$.

Ці спадання напруги мають відповідні кути зсуву фаз стосовно загального струму кола I .

На векторній діаграмі (рис. 4.2, б) відкладені вектори \vec{U}_R , \vec{U}_L , \vec{U}_C і їх додаванням побудований вектор \vec{U} , що має активну $\vec{U}_a = \vec{U}_R$ і реактивну $\vec{U}_p = \vec{U}_L + \vec{U}_C$ складові. Для сумарної напруги U можна записати:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}. \quad (4.3)$$

Величина $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ **називається повним опором кола і виражається в омах.**

Співвідношення $U/I = Z$ – вираження закону Ома для кола змінного струму. Повна провідність кола $y = 1/Z$.

Кут зсуву фаз між струмом і напругою кола визначається тригонометричними функціями $\cos\varphi = U_R/U = R/Z$; $\sin\varphi = (U_L - U_C)/U = (X_L - X_C)/Z$. Якщо $X_L > X_C$, то вектор \vec{U} випереджає вектор \vec{I} , якщо $X_L < X_C$, то \vec{U} відстає від \vec{I} .

Активна потужність кола

$$P = U_R I = UI \cos \varphi, \quad (4.4)$$

реактивна потужність

$$Q = (U_L - U_C)I = UI \sin \varphi. \quad (4.5)$$

Добуток діючих значень напруги і струму кола називається повною потужністю :

$$S = UI. \quad (4.6)$$

Очевидно, що $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$, тому що $\sin^2\varphi + \cos^2\varphi = 1$.

Величина $\cos\varphi$ називається коефіцієнтом потужності.

Паралельне з'єднання. Струми в гілках паралельно з'єднаних елементів кіл мають відповідний фазовий зсув стосовно загальної напруги цих кіл. Тому загальний струм кола дорівнює сумі струмів окремих гілок з урахуванням фазових зсувів. Інакше кажучи, в цьому випадку *вектор загального струму визначається сумою векторів струмів паралельних гілок.*

Розглянемо паралельне з'єднання трьох елементів, що мають активний опір R , індуктивний X_L і ємнісний X_C (рис. 4.3, а).

Для струмів гілок можна записати:

$$I_R = \frac{U}{R} \times U \times g; \quad I_L = \frac{U}{X_L} \times U \times b_L; \quad I_C = \frac{U}{X_C} \times U \times b_C. \quad (4.7)$$

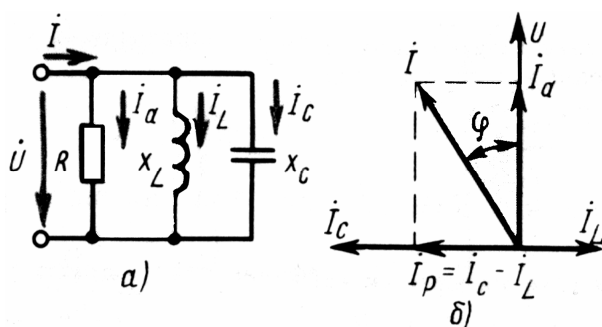


Рисунок 4.3 – Схема електричного кола з паралельним з'єднанням активного, індуктивного і ємнісного опору та векторна діаграма для його розрахунку

На векторній діаграмі (рис. 4.3, б) відкладені вектори \vec{I}_R , \vec{I}_L , \vec{I}_C і їх додаванням побудований вектор \vec{I} , що має активну $\vec{I}_a = \vec{I}_R$ і реактивну $\vec{I}_p = \vec{I}_L + \vec{I}_C$ складові. Для сумарного струму I маємо:

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2} = U \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = Uy. \quad (4.8)$$

Кут зсуву фаз φ між струмом I і напругою U визначається тригонометричними функціями: $\cos\varphi = I_R/I = g/y$; $\sin\varphi = (I_L - I_C)/I = (b_L - b_C)/y$.

Якщо $b_L > b_C$, то навантаження в цілому має активно-індуктивний характер (вектор \vec{U} випереджає \vec{I}), якщо $b_L < b_C$ – активно-ємнісний (вектор \vec{U} відстає від вектора \vec{I} на кут φ).

Активна потужність кола $P = UI_R = UI \cos \varphi$, реактивна потужність $Q = U(I_L - I_C) = UI \sin \varphi$, повна потужність $S = UI = P / \cos \varphi = Q / \sin \varphi$.

Приклади розв'язання задач

Приклад 4.1. Для визначення індуктивності котушки її включили спочатку в коло постійного струму за схемою рис. 4.4, причому вольтметр показав $U_{\Pi} = 48$ В, а струм у колі дорівнював $I_{\Pi} = 8$ А. Потім котушку включили в коло змінного струму із частотою 50 Гц. При цьому показання вольтметра дорівнювали $U_{3\text{М}} = 120$ В при струмі $I_{3\text{М}} = 12$ А. Визначити індуктивність котушки.

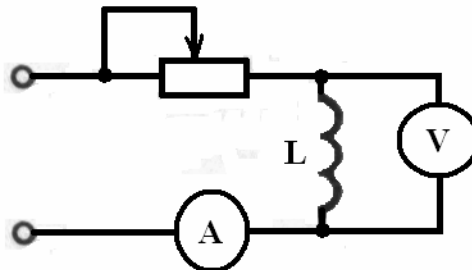


Рисунок 4.4 – Схема до прикладу 4.1

Рішення: Активний опір котушки складає $R = \frac{U_{\Pi}}{I_{\Pi}} = \frac{48}{8} = 6$ Ом.

Повний опір котушки $Z = \frac{U_{3\text{М}}}{I_{3\text{М}}} = \frac{120}{12} = 10$ Ом.

Індуктивний опір $X = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{10^2 - 6^2} = 8$ Ом

Індуктивність котушки $L = \frac{X}{2\pi f} = \frac{8}{2 \times 3,14 \times 50} = 0,0255$ Гн = 25,5 мГн

Приклад 4.2. Приймачі електроенергії, включені за схемою рисунок 4.5, приєднані до мережі синусоїдального змінного струму. Показання приладів: ватметра 940 Вт, вольтметра 220 В, амперметра 5 А. Опір $R_2 = 22$ Ом.

Визначити величину опорів R_1 і X_1 . Знайти величину напруги на ділянці 1 – 2 і визначити зсув фаз на цій ділянці.

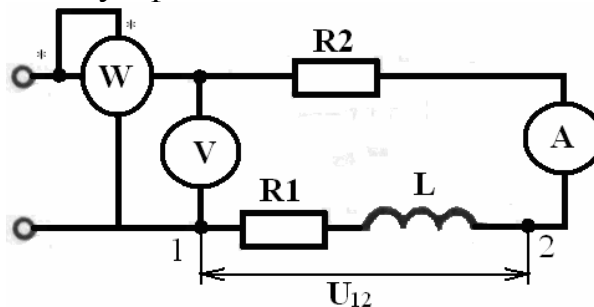


Рисунок 4.5 – Схема до прикладу 4.2

Рішення:

Активна потужність на ділянці з опором R_2

$$P_2 = I^2 \times R_2 = 5^2 \times 22 = 550 \text{ Вт.}$$

Активна потужність на ділянці 12

$$P_1 = P - P_2 = 940 - 550 = 390 \text{ Вт.}$$

Активний опір цієї ділянки

$$R_1 = \frac{P_1}{I^2} = \frac{390}{5^2} = 15,6 \text{ Ом}$$

Зсув фаз струму й загальної напруги

$$\cos \varphi = \frac{P}{U \times I} = \frac{940}{220 \times 5} = 0,855, \text{ отже, } \varphi = 31^\circ 15'.$$

Реактивний опір ділянки 12 можна виразити наступним виразом:

$$X_1 = Z \times \sin \varphi,$$

$$\text{де } Z = \frac{U}{I} = \frac{220}{5} = 44 \text{ Ом, а } \sin \varphi = 0,519.$$

$$\text{Отже, } X_1 = Z \times \sin \varphi = 44 \times 0,519 = 22,8 \text{ Ом}$$

Наруга на ділянці 1 – 2

$$U_{1-2} = I \times \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = 5 \times \sqrt{15,6^2 + 22,8^2} = 138,1 \text{ В}$$

Зсув фаз на ділянці 1 – 2

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_1}{R_1} = \frac{22,8}{15,6} = 1,46, \text{ а } \varphi = 55^\circ 30'$$

Приклад 4.3 Визначити величину активного опору і ємності (рис. 4.6), якщо амперметр показує 4,2 А, вольтметр – 220 В, ватметр – 325 Вт.

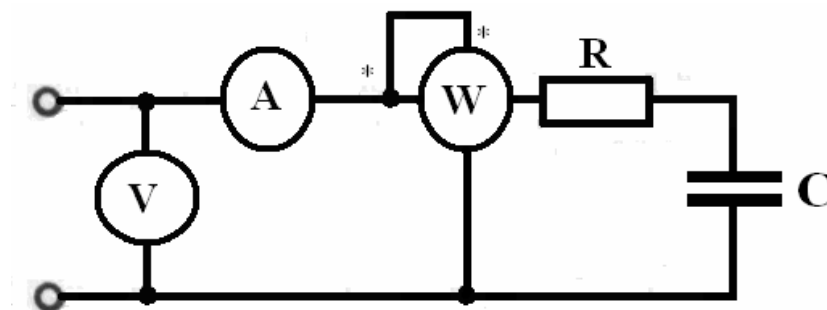


Рисунок 4.6 – Схема до прикладу 4.3

Рішення:

Активний опір кола

$$R = \frac{P}{I^2} = \frac{3325}{4,2^2} = 18,4 \text{ Ом}$$

Повний опір кола

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{220}{4,2} = 52,4 \text{ Ом}$$

Реактивний опір кола

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{52,4^2 - 18,4^2} = 49,1 \text{ Ом}$$
$$C = \frac{1}{\omega X_c} = \frac{1}{2 \times 3,14 \times 50 \times 49,1} = 65,1 \cdot 10^{-6} \text{ мкФ}$$

Задачі для самостійного розв'язання

Задача 4.1 Визначити струм в котушці за даними прикладу 4.1, якщо ця котушка буде включена на синусоїдальну напругу із частотою 200 Гц, а напруга на її затискаках буде дорівнювати 120 В?

Задача 4.2 Ділянка з активним опором R_1 і індуктивним X_1 ввімкнена послідовно з ділянкою, що містить активний опір R_2 (рис. 4.5). При приєднанні цього кола в мережу з напругою 127 В виявилось, що на першій ділянці споживається потужність 800 Вт при коефіцієнті потужності 0,6, а на другому потужність 1,2 кВт. Визначити струм у даному колі й загальний коефіцієнт потужності.

Задача 4.3 Прилади, включені в коло котушки (рис. 4.6), показують: амперметр 5 А, вольтметр 220 В, ватметр 660 Вт. Визначити коефіцієнт потужності й параметри котушки, тобто її активний опір і індуктивність.

Як зміняться покази амперметра й ватметра і коефіцієнт потужності котушки, якщо частота мережі буде дорівнювати 200 Гц, а напруга залишиться незмінною?

Задача 4.4 Активний опір рівний 4 Ом і котушка з активним опором 6 Ом і індуктивним 8 Ом з'єднані послідовно й включені в мережу з напругою 220 В.

Визначити активну, реактивну й повну потужності даного кола.

Задача 4.5 У мережу змінного струму включені послідовно дві котушки: одна з активним опором 12 Ом і індуктивністю 22 мГн, інша з активним опором 8 Ом і індуктивністю 9,6 мГн. Струм у котушках дорівнює 5,7 А, а частота дорівнює 50 гц. Визначити потужність, яку споживає кожна котушка, і потужність всього кола.

Задача 4.6 В мережу напругою 220 В ввімкнені послідовно два приймачі: один з активним опором 20 Ом і ємністю 75 мкФ, а другий з активним опором 60 Ом і ємністю 175 мкФ (рис. 4.7).

Визначити струм в колі і побудувати трикутники опорів для першого і другого приймачів, а також для всього кола.

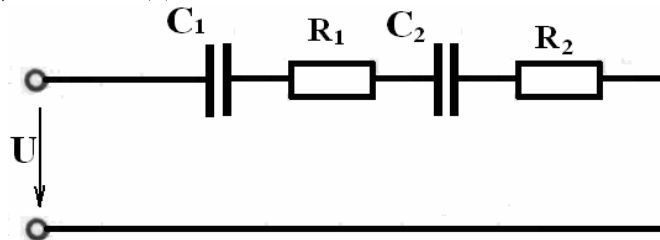


Рисунок 4.7 – До задачі 4.6

Задача 4.7 Вольтметр, встановлений на щитку споживача показує 120 В, амперметр – 450 А, а ватметр – 50 кВт. Визначити активний, реактивний, повний опір споживача, а також реактивну, повну потужність і коефіцієнт потужності $\cos \varphi$ споживача.

Практичне заняття 5

Тема: Електричні кола трифазного струму

Теоретичні відомості

Трифазна система являє собою сукупність трьох електричних кіл змінного струму однієї частоти, ЕРС яких зсунуті за фазою на $1/3$ періоду.

Звичайно амплітуди цих ЕРС рівні, тобто система симетрична. На рисунку 5.1, а дана часова діаграма таких ЕРС: e_A , e_B , e_C ; на рисунку 5.1, б – їхня векторна діаграма.

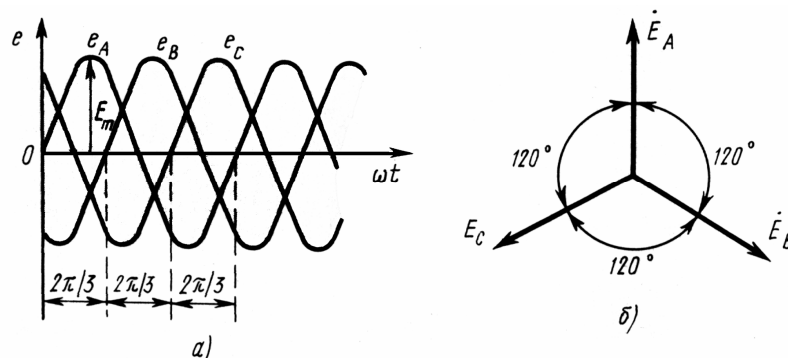


Рисунок 5.1 – Графік миттєвих значень трифазної системи ЕРС (а) і векторна діаграма (б)

Кожне окреме коло трифазної системи називають фазою.

Електроспоживачі й обмотки джерел енергії у трифазних системах можуть бути з'єднані зіркою або трикутником (рис. 5.2).

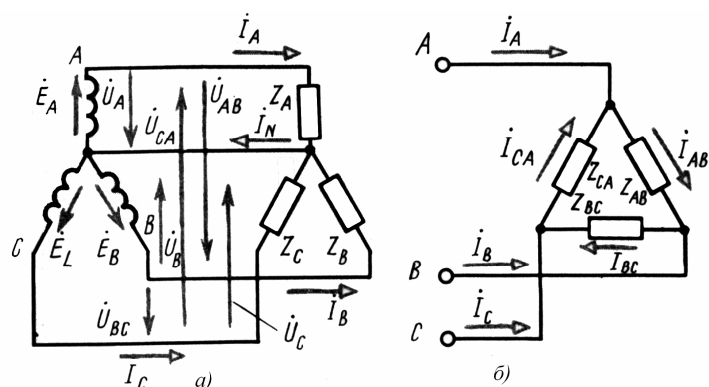


Рисунок 5.2 – Схеми з'єднань трифазних кіл

З'єднання приймачів зіркою. При з'єднанні фаз приймачів зіркою напруги на їхніх затискачах називають *фазними* U_ϕ (U_A , U_B , U_C), а напруги між лінійними проводами – *лінійними* $U_\text{л}$ (U_{AB} , U_{BC} , U_{CA}). На рисунку 5.2, а зазначені лінійні й фазні напруги, а на рисунку 5.3 побудована векторна діаграма для симетричної системи живильних напруг.

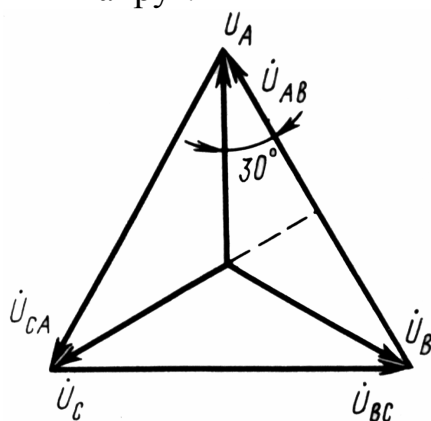


Рисунок 5.3 – Векторна діаграма напруг при з'єднанні приймача енергії в зірку

Співвідношення між векторами фазних і лінійних напруг такі:

$$\vec{U}_{AB} = \vec{U}_A - \vec{U}_B; \vec{U}_{BC} = \vec{U}_B - \vec{U}_C; \vec{U}_{CA} = \vec{U}_C - \vec{U}_A \quad (5.1)$$

Для симетричної системи

$$U_\text{л} = \sqrt{3}U_\phi. \quad (5.2)$$

При з'єднанні приймачів зіркою трифазна система буває *чотирипровідною* (так вмикають освітлювальні й побутові прилади, однофазні двигуни і т.д.) або *трипровідною* (трифазні двигуни, індукційні печі та ін.).

Для чотирипровідної системи (рис. 5.2, а), де приймачі включені між нейтральним проводом і кожним з лінійних проводів, можна записати:

$$I_\text{л} = I_\phi; \quad (5.3)$$

$$I_A = U_A/Z_A; I_B = U_B/Z_B; I_C = U_C/Z_C; \quad (5.4)$$

$$\cos\varphi_A = R_A/Z_A; \cos\varphi_B = R_B/Z_B; \cos\varphi_C = R_C/Z_C; \quad (5.5)$$

Миттєве значення струму в нейтральному проводі

$$i_N = i_A + i_B + i_C. \quad (5.6)$$

Діюче значення струму в нейтральному проводі характеризується геометричним додаванням векторів фазних струмів:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (5.7)$$

Навантаження всіх трьох фаз називається симетричним, якщо струм у них однаковий і рівні зсуви фаз між фазними напругами і струмами.

При симетричному навантаженні сума векторів фазних струмів утворює замкнутий трикутник. Отже струм у нейтральному проводі дорівнює нулю. З цієї причини для симетричного трифазного навантаження (наприклад, трифазного двигуна) нейтральний провід не потрібний.

Розрахунок симетричної трифазної системи при рівномірному навантаженні зводиться до розрахунку однієї фази незалежно від наявності нейтрального проводу. У цьому випадку фазна напруга

$$U_A = U_B = U_C = U_\phi = U_\pi / \sqrt{3},$$

фазний струм

$$I_A = I_B = I_C = I_\phi = U_\phi / Z_\phi,$$

косинус кута зсуву фаз струму і напруги

$$\cos \varphi = R_\phi / Z_\phi,$$

активна, реактивна і повна потужність відповідно:

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = \sqrt{3}U_\pi I_\pi \cos \varphi;$$

$$Q = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi = \sqrt{3}U_\pi I_\pi \sin \varphi;$$

$$S = 3U_\phi I_\phi = \sqrt{3}U_\pi I_\pi.$$

При несиметричній системі напруг або при нерівномірному навантаженні фаз потужності визначаються окремо для кожної фази.

З'єднання приймачів трикутником. При з'єднанні приймачів енергії трикутником (рис. 5.2, б) їхні фази приєднують до лінійних проводів, що йдуть від джерела електроенергії. Струм у кожному з лінійних проводів дорівнює різниці фазних струмів (за позитивні напрямки струмів тут, як і раніше, приймають напрямок від генератора до приймача). Це справедливо як для миттєвих, так і для діючих значень струмів, що знаходять як геометричну різницю векторів відповідних фазних струмів (рис. 5.4):

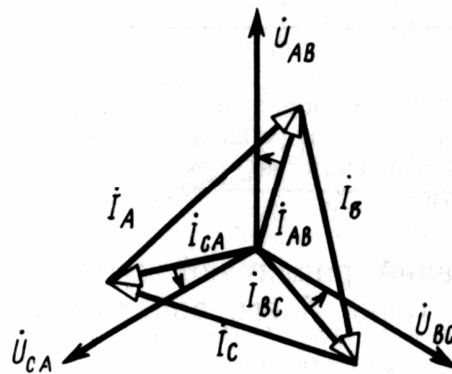


Рисунок 5.4 – Векторна діаграма напруг і струмів симетричного приймача, з'єднаного трикутником

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}; \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}.$$

Якщо система лінійних напруг *симетрична*, тобто $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{\phi} = U_{\text{л}}$, навантаження фаз рівномірне, тобто $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA}$ і $\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = \varphi_{\phi}$, то й діючі значення фазних струмів рівні між собою, мають однаковий фазовий зсув φ_{ϕ} щодо відповідних напруг і на 120° один відносно іншого. У цьому разі

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\phi}; \cos \varphi_{\phi} = R_{\phi} / Z_{\phi}; P = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \varphi; Q = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \sin \varphi; S = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}.$$

Приклади розв'язання задач

Приклад 5.1

Трифазний двигун серії А розвиває потужність 10 кВт. Визначити струм у лінії, якщо коефіцієнт потужності двигуна дорівнює 0,87, к. к. д. його 0,82, а лінійна напруга мережі 220 В.

Визначити параметри схеми заміщення двигуна, якщо обмотки статора з'єднані зіркою.

На яку напругу потрібно вмикати двигун трикутником, щоб він розвивав ту ж потужність?

Рішення:

Електрична потужність двигуна

$$P_e = \frac{P_{\text{мех}}}{\eta} = \frac{10}{0,82} = 12,2 \text{ кВт}$$

Фазний струм

$$I = \frac{P_e}{\sqrt{3} \times U \times \cos \varphi} = \frac{12200}{\sqrt{3} \times 220 \times 0,87} = 36,8 \text{ А}$$

Потужність однієї фази

$$P_a = \frac{P_e}{3} = \frac{12,2}{3} = 4,07 \text{ кВт}$$

Активний опір фази

$$R_{\phi} = \frac{P_{\phi}}{I^2} = \frac{4070}{37^2} = 2,97 \text{ Ом}$$

Повний опір фази

$$Z_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{I} = \frac{220}{\sqrt{3} \times 37} = \frac{127}{37} = 3,43 \text{ Ом}$$

Реактивний опір фази

$$X = Z \times \sin \varphi = 3,43 \times 0,492 = 1,69 \text{ Ом}$$

Трикутником двигун може бути приєднаний до мережі напругою 127 В, тому, що в цьому разі на кожен фазу буде діяти така ж напруга, як і при вми-
канні зіркою в мережу 220 В.

Задачі для самостійного розв'язання

Задача 5.1 Три групи освітлювальних ламп розжарювання потужністю 200 Вт кожна номінальною напругою 220 В з'єднані зіркою з нейтральним про-
водом (рис. 5.5). В фазі А включені 6 ламп, в фазі В – 4, в фазі С – 2. Лінійна напруга мережі – 380 В. Визначити опори фаз, фазні струми і струм в нейтраль-
ному проводі, побудувати векторну діаграму.

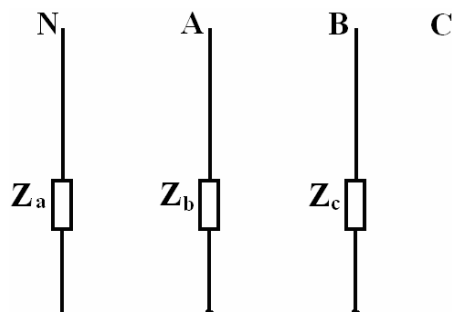


Рисунок 5.5 – До задачі 5.1

Задача 5.2 До трифазного генератора з лінійною напругою 380 В приєдна-
ний несиметричний споживач з активним навантаженням, з'єднаний трикутни-
ком. Опір фаз $R_{ab} = 5 \text{ Ом}$, $R_{bc} = 10 \text{ Ом}$, $R_{ca} = 10 \text{ Ом}$, опір проводів $R_{\text{пр}} = 0,5 \text{ Ом}$.
Визначити лінійні струми.

Задача 5.3 У трьохпровідну лінію трифазного струму включені три однакові
катушки. Як зміниться струм у котушках, струм у проводах, що підводять струм, і
споживана потужність, якщо катушки перемкнути із зірки на трикутник.

Задача 5.4. Мідні дроти трифазної повітряної лінії напругою 6,6 кВ мають пе-
реріз 50 мм^2 . До кінця лінії приєднаний споживач, потужність якого дорівнює 800
кВт, і $\cos \varphi = 0,8$. Визначити струм і напругу на початку лінії, якщо довжина
лінії $l = 8 \text{ км}$, а реактивний опір кожного кілометра проводу дорівнює 0,4 Ом.
Скласти електричну схему й побудувати векторну діаграму для неї.

Практичне заняття 6

Тема: Трансформатори

Теоретичні відомості

Як правило трансформатор складається зі сталевого замкнутого *магнітопроводу* і двох або декількох індуктивно зв'язаних між собою *обмоток*.

Обмотки трансформаторів найчастіше виконують у вигляді циліндричних котушок з мідних або алюмінієвих ізольованих один від одного проводів круглого або прямокутного перерізу.

Принцип дії. Дія трансформатора заснована на явищі взаємної індукції. Розглянемо *двохобмотковий однофазний трансформатор* (рис. 6.1). У ньому є індуктивно зв'язані обмотки: *первинна* ω_1 і *вторинна* ω_2 . Якщо первинну обмотку підключити до джерела змінної напруги U_1 , то по ній протікатиме струм i , що збудить в осерді трансформатора змінний магнітний потік Φ . Цей потік, пронизуючи витки обмоток трансформатора, буде індукувати у них ЕРС e_1 і e_2 .

Якщо вторинну обмотку замкнути на який-небудь приймач енергії з опором Z_H , то по цій обмотці і через приймач протікатиме струм i_2 .

У такий спосіб електрична енергія, трансформуючись, передається з первинного кола у вторинне.

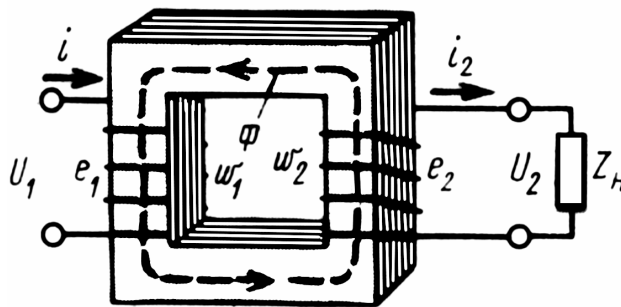


Рисунок 6.1 – Електромагнітна схема двухобмоткового трансформатора

ЕРС в обмотках. Миттєві значення ЕРС, індукованих в обмотках трансформатора, визначаються виразами

$$e_1 = -\omega_1 \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}, \quad e_2 = -\omega_2 \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}. \quad (6.1)$$

Діючі значення цих ЕРС при синусоїдальній зміні магнітного потоку Φ

$$E_1 \approx 4.44 \omega_1 f \Phi_m, \quad E_2 \approx 4.44 \omega_2 f \Phi_m, \quad (6.2)$$

де f – частота мережі, Гц; Φ_m – максимальне значення основного потоку, Вб.

Відношення ЕРС обмоток трансформатора, дорівнює відношенню числа витків і називається коефіцієнтом трансформації

$$k_T = E_1 / E_2 = \omega_1 / \omega_2. \quad (6.3)$$

При $k_T > 1$ трансформатор понижуючий, при $k_T < 1$ – підвищувальний. Будь-який трансформатор може бути використаний і як підвищувальний, і як понижувальний.

Режими роботи. У режимі холостого ходу трансформатора коло його вторинної обмотки розімкнуте; до первинного підведена номінальна напруга $U_{1н}$, у ньому протікає невеликий струм холостого ходу I_0 . За цих умов можна вважати, що $E_1 = U_1$ і $E_2 = U_2$, тому коефіцієнт трансформації і визначають при цьому режимі роботи трансформатора.

Дослідом холостого ходу можна знайти також втрати потужності P_0 у сталі магнітопроводу на гістерезис і вихрові струми.

У *робочому режимі* роботи трансформатора його обмотками ω_1 і ω_2 проходять струми I_1 і I_2 при напругах на обмотках U_1 і U_2 . У *номінальному робочому режимі* – номінальні струми $I_{1н}$, $I_{2н}$ при номінальних напругах $U_{1н}$ і $U_{2н}$.

Нехтуючи спадом напруги в первинній обмотці трансформатора, можна вважати $U_1 \approx E_1$. Тоді при незмінній за значенням напрузі $U_1 = U_{1н}$ при будь-якому навантаженні трансформатора ЕРС E_1 постійна. Оскільки ЕРС E_1 залежить від магнітного потоку ($E_1 = 4.44 \omega_1 \Phi f$), то і магнітний потік при будь-якому навантаженні можна вважати постійним.

Струм I_2 , що проходить у вторинній обмотці трансформатора, створює свій магнітний потік. При збільшенні струму I_2 збільшується і струм I_1 . Магнітні потоки, створювані цими струмами, врівноважуються, і результуючий магнітний потік в осерді зберігає практично незмінне значення.

Якщо знехтувати втратами в трансформаторі, то можна вважати рівними потужності трансформатора, споживану з мережі і ту, що віддається споживачеві:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2. \quad (6.4)$$

Тоді

$$I_2/I_1 = U_1/U_2 = \omega_1/\omega_2 = k_T; I_2 = k_T I_1.$$

У *понижуючому трансформаторі* $U_1 > U_2$ у k_T раз; $I_1 < I_2$ також у k_T раз. У *підвищувальному трансформаторі* співвідношення зворотне.

Завантаження трансформатора в робочому режимі оцінюються коефіцієнтом завантаження

$$\beta = \frac{P_2}{S_n \cos \varphi} = \frac{I_2}{I_{2н}}, \quad (6.5)$$

де P_2 – корисна потужність трансформатора;

S_n – номінальна повна потужність;

$\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності навантаження.

У *режимі короткого замикання* вторинна обмотка трансформатора замкнута накоротко. Слід розрізняти коротке замикання в умовах експлуатації і досліду. Дослід короткого замикання виконують при такій первинній напрузі, щоб значення струмів I_1 і I_2 обмоток трансформатора були номінальними. Цю напругу U_k (у відсотках від $U_{1н}$) вказують на щитку трансформатора поруч з іншими номінальними даними. Вона характеризує значення опорів обмоток трансформатора і використовується при розрахунках спадання напруги при навантаженні і струмі короткого замикання:

$$I_{1к} = I_{1н} \frac{100}{U_k \%}. \quad (6.6)$$

Меншому значенню ЕРС $E_1 \approx U_k$ відповідає менше значення магнітних втрат. Втрати P_k в обмотках, які визначаються у цьому досліді такі ж, як і в номінальному режимі роботи трансформатора, тому що в обмотках протікають номінальні струми.

Зовнішня характеристика. Зі зміною навантаження трансформатора змінюються струми I_1 і I_2 в його обмотках, спадання напруги в них і напруга U_2 на затискачах вторинної обмотки.

Залежність $U_2(I)$ називається зовнішньою характеристикою. При активно-індуктивному, навантаженні ця характеристика має вигляд похилої прямої, (рис. 6.2), де показана зміна напруги ΔU при номінальному струмі I_{2H} .

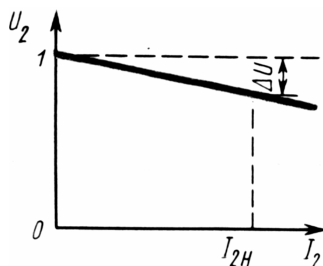


Рисунок 6.2 – Зовнішня характеристика трансформатора

Втрати і ККД. Перетворення електроенергії в трансформаторах відбувається з високим ККД (до 98 – 99 %). Періодичні зміни магнітного поля в магнітопроводі трансформатора супроводжуються втратами в сталі магнітопроводу на гістерезис і вихрові струми.

Втрати в сталі не залежать від навантаження і дорівнюють втратам холостого ходу:

$$\Delta P_{\text{ст}} = P_0. \quad (6.7)$$

Протікання струмів обмотками трансформатора викликає *втрати потужності в них*, пропорційні квадрату коефіцієнта завантаження трансформатора:

$$\Delta P_{\text{об}} = \beta^2 P_k, \quad (6.8)$$

де P_k – номінальні втрати в обмотках.

ККД трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{об}}} = \frac{\beta S_n \cos \varphi}{\beta S_n \cos \varphi + P_0 + \beta^2 P_k}. \quad (6.9)$$

Трифазний трансформатор. Для трансформації трифазного струму можливо використовувати три однофазних трансформатори (рис. 6.5, а), але частіше застосовують *трифазні трансформатори* (рис. 6.5, б) із загальним для всіх фаз магнітопроводом.

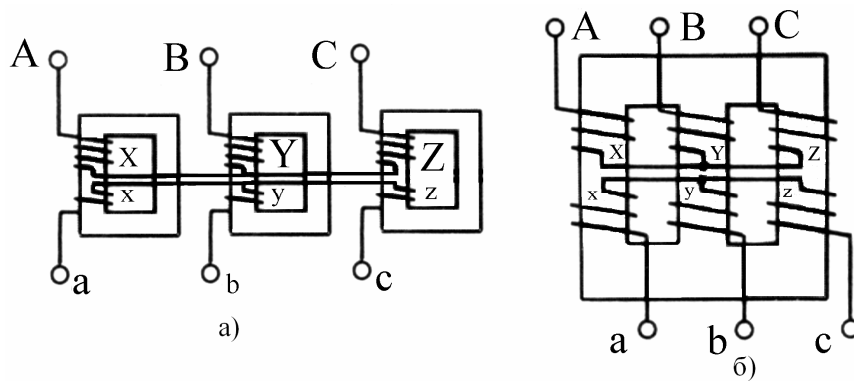


Рисунок 6.3 – Схеми вмикання трансформаторної групи (а) і трифазного тристержневого трансформатора (б)

Основними способами з'єднання обмоток є з'єднання зіркою і трикутником. Відношення лінійних напруг залежить від способу з'єднань обмоток трансформатора. При схемах з'єднання обмоток зірка або трикутник відношення напруг дорівнюють коефіцієнту трансформації; при схемах зірка – трикутник і трикутник – зірка відношення напруг відповідно більше і менше цього коефіцієнта в $\sqrt{3}$ раз.

Приклади розв'язання задач

Приклад 6.1 Трифазний трансформатор працює на освітлювальну мережу з навантаженням 45 кВт. Вторинна напруга дорівнює при цьому навантаженні 220 В, а первинна – 6000 В. Визначити вторинний і первинний струми трансформатора, якщо він з'єднаний за схемою Y/Y і працює з к. к. д. 0,9.

Зауваження. Величину $\cos \varphi_1$ приблизно приймаємо рівним одиниці, тому що навантаження активне.

Рішення:

Фазна потужність у вторинній обмотці (навантаження вважається рівномірним)

$$P_{\phi} = \frac{P_2}{3} = \frac{45}{3} = 15 \text{ кВт}$$

Вторинна фазна напруга

$$U_{\phi} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ В}$$

Вторинний струм

$$I_2 = \frac{15000}{127} = 118 \text{ А},$$

$$\text{чи } I_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3} \times U_2 \times \cos \varphi_2} = \frac{45000}{\sqrt{3} \times 220 \times 1,0} = 118 \text{ А}$$

Оскільки $P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{45}{0,9} = 50$ кВт, то первинний струм

$$I = \frac{P_1}{\sqrt{3} \times U_1 \times \cos \varphi_1} = \frac{50000}{\sqrt{3} \times 6000 \times 1,0} = 4,8 \text{ А.}$$

Задачі для самостійного розв'язання

Задача 6.1 Однофазний трансформатор включений у мережу 220 В. Первинна обмотка трансформатора має 800 витків, вторинна – 46 витків. Визначити коефіцієнт трансформації і напругу вторинної обмотки.

Задача 6.2 Вторинна обмотка трансформатора, вказаного у попередньому завданні живить лампи розжарювання, струм при цьому складає 8 А. Визначити струм, який споживає трансформатор з мережі, якщо к. к. д. його дорівнює 90%.

Задача 6.3 Вторинна обмотка трифазного трансформатора дає потужність 30 кВА; к. к. д. трансформатора 95 % і включений він у мережу 3000 В. Визначити струм первинної обмотки.

Задача 6.4 Трьохпровідна мережа живить трифазний трансформатор, номінальна потужність якого дорівнює 75 кВА при напрузі 400 В.

У мережу включене рівномірне змішане навантаження, причому фазні опори еквівалентної зірки навантаження дорівнюють: активний 2 Ом і індуктивний 1,5 Ом.

Чи можна підключити в дану мережу ще яке-небудь навантаження (чисто активне чи активне і індуктивне), якщо можна то яке?

Задача 6.5 Які будуть коефіцієнти трансформації лінійних напруг трифазного трансформатора при групах з'єднань Y/Y, Y/D и D/Y, якщо відношення числа витків, що припадає на одну фазу, $\frac{\omega_1}{\omega_2} = 2$.

Задача 6.6 Для одержання чотирьохпровідної трифазної системи з'єднали в групу три однакових однофазних трансформатори по 25 кВА при вторинній напрузі 220 В. В отриману мережу включили змішане навантаження, причому фазні опори еквівалентної зірки навантаження дорівнювали: активне 20 Ом і індуктивне 15 Ом. Визначити струми в проводах.

Задача 6.7 Три однакових однофазних трансформатори з'єднані в групу, причому вторинні обмотки їх утворюють зірку із лінійною напругою 380 В. До даної групи трансформаторів підключена рівномірне й однорідне навантаження, причому активний опір кожної фази еквівалентного трикутника навантаження дорівнює 31,6 Ом, а індуктивний – 24,5 Ом.

Визначити фазні й лінійні струми.

Практичне заняття 7

Тема: Асинхронні машини.

Теоретичні відомості

Асинхронні машини найчастіше використовують як *двигуни*. Найбільше застосування одержали *трифазні асинхронні двигуни*.

Недоліком асинхронних двигунів є труднощі, в'язані з регулюванням частоти обертання. Крім того, ці двигуни мають відносно низький $\cos\varphi$ (0,85 – 0,9 при повному навантаженні; і 0,2 – 0,3 на холостому ході).

Залежно від конструкції обмотки ротора розрізняють асинхронні двигуни з короткозамкнутим і фазним роторами.

Трифазний асинхронний *двигун з короткозамкнутим ротором* найбільш простий, надійний у роботі і дешевий. Обмотку ротора такого двигуна звичайно виконують з алюмінієвих стержнів, які заливають без ізоляції в пази.

У пазах ротора *двигуна з фазним ротором* укладають обмотку, подібну до обмотки статора. Фазні обмотки ротора з'єднують у зірку, а три її виводи приєднують до трьох контактних кілець, насаджених на вал і ізольованих одне від одного і від вала. Щітками, накладеними на кільця, обмотка ротора може бути замкнута накоротко або на опір. Двигуни з фазним ротором складніші, дорожчі і менш надійні в експлуатації, ніж з короткозамкнутим, але мають кращі пускові й регульовальні властивості.

Ротор двигуна обертається з асинхронною швидкістю n_2 меншою, ніж синхронна швидкість обертання поля n_1 . Різниця швидкостей обертання поля і ротора характеризується *ковзанням* S , яке часто виражається у відсотках:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%. \quad (7.1)$$

У *номінальному режимі роботи двигуна* S звичайно невелике (2–6 %). Якщо ротор *нерухомий* ($n_2 = 0$), то $S = 100\%$.

Наявність різниці швидкостей n_1 і n_2 *принципово необхідна* (у двигуні), тому що тільки при цьому магнітне поле перетинає провідники ротора, у них наводиться ЕРС, виникають струми, створюється електромагнітний обертовий момент.

Ковзання асинхронного двигуна в залежності від навантаження майже не змінюється. Але асинхронна машина, працюючи в режимі двигуна, змінює швидкість обертання від $n = 0$ (момент пуску) до $n \approx n_1$. (холостий хід) і, відповідно, ковзання від $s = +1$ до $s = 0$.

Зі зміною швидкості обертання ротора двигуна змінюється частота е. р. с і струмів в обмотці ротора, що видно з рівняння

$$f_2 = \frac{p \times (n_1 - n_2)}{60} = \frac{p \times n_1}{60} \times \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} = f_1 \times s \quad (7.2)$$

При пуску двигуна $s = 1$, $f_2 = f_1$; при холостому ході $s \approx 1$, $f_2 \approx 0$.
Величина е. р. с., що наводиться в обмотці ротора дорівнює

$$E_{2s} = 4,44 f_2 \times w_2 \times k_2 \times \Phi_m, \quad (7.3)$$

де E_{2s} – електрорушійна сила в обмотці ротора;

Φ_m – максимальне значення магнітного потоку статора;

$k_2 < 1$ – обмотковий коефіцієнт, що враховує зменшення е. р. с. ротора внаслідок геометричного додавання е. р. с., що наводяться в окремих його провідниках, і вкорочення кроку обмотки ротора.

Оскільки, $f_2 = f_1 \times s$, то величина е. р. с. E_{2s} при деякому ковзанні виражається формулою

$$E_{2s} = 4,44 f_1 \times s \times w_2 \times k_2 \times \Phi_m = E_2 \times s, \quad (7.4)$$

де E_2 – е. р. с. в фазі обмотки ротора в момент пуску, коли $f_2 = f_1$.

Приклад 7.1 Визначити ковзання у відсотках для шести полюсного асинхронного двигуна, якщо його ротор робить 960 об/хв. Частота мережі – 50 Гц.

Рішення: Швидкість обертання електромагнітного поля статора

$$n = \frac{60 \times f}{p} = \frac{60 \times 50}{3} = 1000 \text{ об./хв.}$$

Тоді, ковзання становить

$$S = \frac{1000 - 960}{1000} \cdot 100 = 4\%$$

Приклад 7.2 Амплітудне значення магнітного потоку АД $\Phi_m = 0,015$ Вб, кількість витків в фазних обмотках статора $w_1 = 200$ і ротора $w_2 = 20$, їх обмоткові коефіцієнти $k_1 = 0,94$, а $k_2 = 0,96$, ковзання в номінальному режимі $s_{\text{ном}} = 0,05$, частота мережі 50 Гц. Визначити діюче значення е. р. с. в фазних обмотках статора і нерухомого ротора, коефіцієнт трансформації по е. р. с., частоту е. р. с. і струму в обмотці ротора, а також діюче значення е. р. с. в обмотці ротора при номінальному навантаженні.

Рішення:

Е. р. с., що індукується в фазних обмотках статора і нерухомого ротора

$$E_1 = 4,44 f \times w_1 \times k_1 \times \Phi_m = 4,44 \times 50 \times 200 \times 0,94 \times 0,015 = 626 \text{ В}$$

$$E_2 = 4,44 f \times w_2 \times k_2 \times \Phi_m = 4,44 \times 50 \times 20 \times 0,96 \times 0,015 = 64 \text{ В}$$

Коефіцієнт трансформації по е. р. с.

$$k_e = \frac{w_1 \times k_1}{w_2 \times k_2} = \frac{200 \times 0,94}{20 \times 0,96} = 9,78$$

Частота е. р. с. і струму в обмотці ротора, що обертається

$$f_2 = f_1 \times s_{\text{ном}} = f \times s_{\text{ном}} = 50 \times 0,05 = 2,5 \text{ Гц.}$$

Е. р. с., індукована в обмотці ротора, що обертається

$$E_{2s} = 4,44 f_2 \times w_2 \times k_2 \times \Phi_m = 4,44 \times 20 \times 0,96 \times 2,5 \times 0,015 = 3,2 \text{ В}$$

Задачі для самостійного розв'язання

Задача 7.1 Номінальна частота обертання АД $n_2 = 960$ об/хв.. Визначити число пар полюсів двигуна, номінальне ковзання, частоту е. р. с. в обмотці ротора, який обертається, якщо частота мережі 50 Гц.

Задача 7.2 Трифазний двигун 14 кВт, 220 В працює з $\cos\varphi = 0,88$ при повному навантаженні, причому струм у проводах, що підводять струм, дорівнює 47,5 А. Знайти к. к. д. двигуна.

Задача 7.3 Трифазний двигун, включений трикутником у мережу з напругою 500 В, розвиває потужність 36,8 кВт при $\cos\varphi = 0,875$. К. к. д. його $\eta = 0,92$.

Для якої напруги може бути застосований цей двигун, якщо його обмотку з'єднати зіркою за умови, що струм у кожній фазі двигуна повинен залишатися незмінним? Як зміниться при цьому струм у живильних проводах і потужність двигуна?

Задача 7.4 Трифазний асинхронний двигун з коротко замкнутим ротором працює з номінальним ковзанням $s_{\text{ном}} = 0,04$. Частота живильної мережі $f = 50$ Гц, максимальне значення обертового магнітного потоку $\Phi_m = 0,01$ Вб, кількість витків обмотки статора $w_1 = 100$, ротора $w_2 = 1$ і їх обмоткові коефіцієнти $k_1 = 0,95$, $k_2 = 1$. Визначити коефіцієнт трансформації е. р. с., діюче значення е. р. с. в фазах обмотки статора, обертового і нерухомого ротора.

Задача 7.5 В фазі ротора трифазного асинхронного двигуна, який обертається з частотою $n_{2\text{ном}} = 1440$ об./хв., індукується е. р. с. $E_{2s} = 0,15$ В. Частота напруги мережі $f = 50$ Гц. Визначити е. р. с. у фазі ротора в момент пуску двигуна.

Задача 7.6 Трифазний асинхронний двигун включений в мережу з лінійною напругою 220 В. Струм в обмотці статора 30 А при коефіцієнті потужності $\cos\varphi = 0,8$. Сумарні втрати в двигуні складають 1000 Вт. Визначити к. к. д. двигуна.

Практичні заняття 8, 9

Тема: Вибір перерізу проводів ліній

Теоретичні відомості

Вибір перерізу проводів виконується за трьома критеріями: За механічною міцністю ($q_{\text{мех}}$), за струмом навантаження (q_I) і за втратою напруги (q_u).

Вибір за механічною міцністю

В залежності від умов прокладання проводів і матеріалу провідної жили в довідникових таблицях вказуються мінімально припустимі перерізи проводів з точки зору механічної міцності. Вибраний переріз повинен задовольняти умові $q_{\text{мех}} > q_{\text{мін}}$. Для більшості умов прокладання алюмінієвих проводів $q_{\text{мін}} = 2,5 \text{ мм}^2$, а для мідних – $q_{\text{мін}} = 0,5 \text{ мм}^2$.

Вибір за струмом навантаження

Струм у провіднику залежить від потужності електроприймача: чим більша потужність, тим більший струм у провіднику. У провіднику з опором R при протіканні струму I мають місце втрати потужності $I^2 \times R$, при цьому провід і його ізоляція нагріваються. Оскільки потужність втрат залежить від струму і опору проводу, а опір залежить від перерізу проводу, то для проводу з конкретним перерізом із збільшенням струму збільшується температура нагріву ізоляції. Кожний клас ізоляції має максимально допустиму температуру нагріву, відповідно і максимально допустимий струм $I_{\text{доп}}$.

В залежності від перерізу проводу, матеріалу провідної жили, класу ізоляції, умов прокладення проводів і їх кількості в довідникових таблицях приведені допустимі значення струму в проводах [1].

Після визначення розрахункового струму I_p в проводі за таблицями знаходять такий переріз, щоб $I_{\text{доп}} \geq I_p$. Розрахунковий струм залежить від типу і кількості електроприймачів, приєднаних до даної лінії.

У випадку однофазного приймача, приєднаного в кінці лінії, потужністю P , розрахунковий струм знаходять за формулою

$$I_p = \frac{P}{U_{\phi} \times \cos \varphi}, \quad (8.1)$$

де U_{ϕ} – фазна напруга;

$\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності електроприймача.

У випадку трифазного приймача, приєднаного в кінці лінії, розрахунковий струм

$$I_p = \frac{P}{\sqrt{3} \times U_{\text{л}} \times \cos \varphi}, \quad (8.2)$$

де P – потужність трифазного приймача;

$U_{\text{л}}$ – лінійна напруга.

Як однофазні, так і трифазні електроприймачі можуть бути розподілені вдовж однієї лінії (рис. 8.1), тобто приєднані до лінії в різних точках.

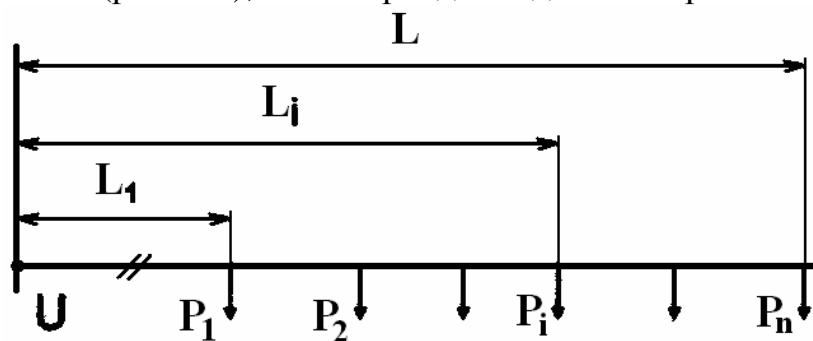


Рисунок 8.1 – Схема приєднання приймачів електроенергії

В цьому випадку в вище приведених формулах потрібно приймати розрахункову потужність.

$$P_p = K_n \sum_{i=1}^n P_i, \quad (8.3)$$

де P_i – номінальна потужність i -го електроприймача:

K_n – коефіцієнт попиту;

n – кількість споживачів, приєднаних до лінії.

Коефіцієнт попиту враховує те, що не всі приймачі електроенергії можуть бути одночасно ввімкненими, не всі працюють в номінальному режимі та інші умови. Для декількох світильників, приєднаних до лінії, що вмикається одним вимикачем коефіцієнт попиту $K_n = 1$. Для лінії що живить світильники ряду приміщень, приймають $K_n = 0,8 - 0,9$.

У випадку приєднання до лінії електродвигунів чи електротехнічних установок із змінною потужністю в першому наближенні для визначення коефіцієнта потужності можна користуватися таблицею 8.1

Таблиця 8.1 – Залежність коефіцієнта попиту від числа електроприймачів

n	2	3	4	5	6	8	9	10	15	20
K_n	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,47	0,44	0,35	0,31

Вибір за втратою напруги

Кожний приймач електроенергії має номінальну напругу, вказану в паспорті. Більшість приймачів допускають відхилення напруги $\pm 5\%$. Це означає, що в лініях передачі до найвіддаленішого споживача допускається втрата напруги не більша 5%.

Як відомо, на ділянці електричного кола з струмом I втрата напруги дорівнює $\Delta U = I (R \times \cos \varphi + X \times \sin \varphi)$, де R і X – активний і індуктивний опір даної ділянки кола. В мережах напругою до 1 кВ індуктивним опором нехтують і вважають, що

$$\Delta U = I \times R \times \cos \varphi. \quad (8.4)$$

У випадку однофазного навантаження в кінці лінії (рис. 8.1) струм навантаження знаходять за формулою (8.1), а опір – за формулою $R = \frac{2L}{\gamma q}$, де γ – питомі провідність матеріалу лінії $\frac{M}{O_M \times M M^2}$, L – довжина лінії, м; q – переріз проводу лінії, mm^2 .

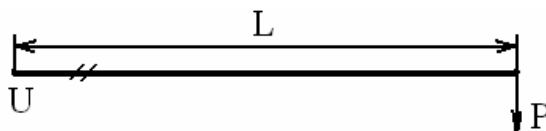


Рисунок 8.1 – Схема однофазної лінії з навантаженням на кінці

Після заміни втрати напруги в вольтах на втрату напруги в % отримуємо формулу для визначення перерізу проводу, який забезпечить допустиму втрату напруги:

Для однофазного навантаження в кінці лінії

$$q_{\Delta u} = \frac{200 \times P \times L}{\gamma \times \Delta u \times U_{\phi}^2} \quad (8.5)$$

Для однофазних навантажень, розподілених вздовж лінії

$$q_{\Delta u} \geq \frac{200 \times \sum_{i=1}^n P_i \times L_i}{\gamma \times \Delta u \times U_{\phi}^2} \quad (8.6)$$

Для трифазного навантаження в кінці лінії

$$q_{\Delta u} = \frac{100 \times P \times L}{\gamma \times \Delta u \times U_n^2} \quad (8.7)$$

Для трифазних навантажень, розподілених вздовж лінії

$$q_{\Delta u} \geq \frac{100 \times \sum_{i=1}^n P_i \times L_i}{\gamma \times \Delta u \times U_n^2} \quad (8.8)$$

В формулах (8.5) – (8.8) питому провідність проводів приймають рівною:
 для алюмінієвих – 33, для мідних – $54 \frac{\text{М}}{\text{ОМ} \times \text{мм}^2}$.

Після знаходження трьох значень перерізу проводу, як вибраний $q_{\text{вибр}}$ приймають найбільший переріз з трьох ($q_{\text{мех}}$, q_i , $q_{\Delta u}$). Далі визначають дійсну втрату напруги на ділянці Δu_d за даного перерізу

$$\Delta u_{\mathbb{D}} = \Delta u \frac{q_{\Delta u}}{q_{\text{spin}}}. \quad (8.9)$$

Приклад 8.1 Асинхронний двигун потужністю $P_2 = 4,5$ кВт, $\cos \varphi = 0,8$, $\eta = 0,85$, $U_{ном} = 380$ В приєднаний до лінії довжиною 40 м. Вибрати переріз проводу марки АПРТО при $\Delta u = 3\%$.

Рішення.

Переріз проводу за механічною міцністю $q_{мех} = 2,5$ мм².

Розрахунковий струм

$$I_p = \frac{P}{\eta \times \sqrt{3} \times U_{л} \times \cos \varphi} = \frac{4500}{0,85 \times \sqrt{3} \times 380_{л} \times 0,8} = 10 \text{ А.}$$

Згідно з таблицею 8.1 для трьох провідної лінії, прокладеної в сталевій трубі, переріз проводу за струмом навантаження $q_i = 2,0$ мм² ($I_{доп} = 18 \text{ А} > 10 \text{ А}$).

Переріз за втратою напруги ($\Delta u = 3\%$)

$$q_{\Delta u} = \frac{100 \times P_2 \times L}{\eta \times \gamma \times \Delta u \times U_{л}^2} = \frac{100 \times 4500 \times 40}{0,85 \times 33 \times 3 \times 380^2} = 1,5 \text{ мм}^2.$$

Остаточно приймаємо переріз 2,5 мм².

Приклад 8.2 Світильники з лампами розжарювання приєднані до однієї лінії напругою 220 В. Потужність лампи $P = 100$ Вт, кількість ламп $n = 15$. Відстань між лампами 4 м, загальна довжина лінії $L = 60$ м. Знайти переріз проводу АПВ, якщо $\Delta u = 2\%$.

Рішення:

Переріз проводу за механічною міцністю $q_{мех} = 2,5$ мм².

Розрахунковий струм

$$I_p = \frac{P}{U_{\phi} \times \cos \varphi} = \frac{100 \times 15}{220 \times 1,0} = 6,82 \text{ А.}$$

Переріз за струмом навантаження $q_i = 2,0$ мм².

Переріз за втратою напруги ($\Delta u = 2\%$)

$$q_{\Delta u} = \frac{200 \times \sum_{i=1}^n P_i \times L_i}{\gamma \times \Delta u \times U_{\phi}^2} = q_{\Delta u} \geq \frac{200 \times 100 \times 480}{33 \times 2 \times 220^2} = 3 \text{ мм}^2.$$

Вибраний переріз $q_{вибр} = 4,0$ мм².

Дійсна втрата напруги на ділянці $\Delta u_{д}$ за даного перерізу

$$\Delta u_{д} = 2 \times \frac{3}{4} = 1,5 \text{ \%}.$$

Приклад 8.3 До трьохпровідної лінії приєднані 10 асинхронних двигунів з однаковим к. к. д. ($\eta = 0,85$) і коефіцієнтом потужності ($\cos \varphi = 0,82$). Лінійна напруга $U_{\text{л}} = 380$ В. Вибрати переріз проводу АПРТО за допустимої втрати напруги $\Delta u_{\text{д}} = 3\%$. Потужність двигунів P_{2i} і відстань L_i між ними наведені в таблиці 8.3.

Таблиця 8.3 – Дані до прикладу 8.3.

P_{2i} , кВт	11	7,5	4,0	15	5,5	4,0	11	3,0	2,2	5,5
L_i , м	10	12	15	20	23	25	28	30	32	35

Рішення:

Переріз проводу за механічною міцністю $q_{\text{мех}} = 2,5 \text{ мм}^2$.

Розрахунковий струм при коефіцієнті попиту $k_{\text{п}} = 0,44$

$$I_p = \frac{k_n \times \sum_{i=1}^{10} P_i}{\eta \times \sqrt{3} \times U_{\text{л}} \times \cos \varphi} = \frac{0,44 \times 68700}{0,85 \times \sqrt{3} \times 380 \times 0,82} \approx 66 \text{ А}$$

Переріз проводу за струмом навантаження $q_i = 25,0 \text{ мм}^2$, для якого $I_{\text{доп}} = 80 > 66 \text{ А}$ при прокладці трьох проводів в сталій трубі (дод. Д1).

Переріз проводу за допустимою втратою напруги

$$q_{\Delta u} = \frac{100 \times k_n \times \sum_{i=1}^n P_i \times L_i}{\eta \times \gamma \times \Delta u \times U_{\text{л}}^2} = \frac{100 \times 0,444 \times 1423 \times 10^3}{0,85 \times 33 \times 3 \times 380^2} = 5,1 \text{ мм}^2.$$

Приймаємо переріз проводу $q_{\text{вибр}} = 4,0 \text{ мм}^2$.

Дійсна втрата напруги на ділянці $\Delta u_{\text{д}}$ за даного перерізу

$$\Delta u_{\text{д}} = 3 \times \frac{4,33}{16} = 0,61\%.$$

Задачі для самостійного розв'язання

Задача 8.1 Вибрати переріз проводу за наявності одного однофазного електроприймача в кінці лінії. Напруга $U_{\text{ф}} = 220$ В. Спосіб прокладки проводів, матеріал провідної жили і допустима втрата напруги задаються окремо. Потужність електроприймача, коефіцієнт потужності і довжина лінії приведені в таблиці 8.1.

Таблиця 8.1 – Дані для задачі 8.1

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P , кВт	3	10	8	12	9,6	5,5	7,2	4,5	6,0	9,0	8,6	7,5
L , м	50	40	60	20	40	55	65	90	80	65	60	70
$\cos \varphi$	0,8	1,0	0,9	0,7	0,6	0,5	0,7	0,8	0,9	0,9	0,8	0,8

Задача 8.2 Вибрати переріз проводу за наявності одного трьохфазного приймача в кінці лінії. Напруга $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$. Прокладка проводів – в трубі. Матеріал провідної жили (мідь чи алюміній) – за вказівкою викладача. Потужність електроприймача, коефіцієнт потужності, довжина лінії і допустима втрата напруги приведені в таблиці 8.2.

Таблиця 8.2 – Дані до задачі 8.2

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P, кВт	3	10	8	12	9,6	5,5	7,2	4,5	6,0	9,0	8,6	7,5
L, м	50	40	60	20	40	55	65	90	80	65	60	70
cos φ	0,8	1,0	0,9	0,7	0,6	0,5	0,7	0,8	0,9	0,9	0,8	0,8
Δu	2	2	2	2	2	2	2,5	2,5	2,5	3	3	3

Задача 8.3 Вибрати переріз проводу за наявності однофазних електроприймачів розподілених вздовж лінії. Напруга $U_{\text{ф}} = 220 \text{ В}$. Прокладка проводів відкрита. Матеріал провідної жили за вказівкою викладача. Потужність електроприймачів і відстань від джерела живлення до електроприймачів приведені в таблиці 8.3.

Таблиця 8.3 – Дані до задачі 8.3

а) $P_1 = 200 \text{ Вт}$; $\cos \varphi = 0,8$; $\Delta u = 1,5\%$												
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
L_i	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27
б) $P_1 = 100 \text{ Вт}$; $\cos \varphi = 1,0$; $\Delta u = 1,5\%$												
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
L_i	10	13	15	18	20	22	25	27	30	32	35	38
в) $P_1 = 100 \text{ Вт}$; $\cos \varphi = 0,6$; $\Delta u = 1,2\%$												
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
L_i	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27
г) $P_1 = 300 \text{ Вт}$; $\cos \varphi = 0,8$; $\Delta u = 1,5\%$												
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
L_i	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27
д) $P_1 = 100 \text{ Вт}$; $\cos \varphi = 0,7$; $\Delta u = 1,5\%$												
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
L_i	10	13	15	18	20	22	25	27	30	32	35	38
е) $P_1 = 200 \text{ Вт}$; $\cos \varphi = 1,0$; $\Delta u = 1,5\%$												
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
L_i	10	13	15	18	20	22	25	27	30	32	35	38

Задача 8.4 Вибрати переріз проводу за наявності трьохфазних електроприймачів розподілених вздовж лінії. Напруга $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$. Прокладка проводів в трубах. Матеріал провідної жили за вказівкою викладача. Потужність електроприймачів і відстань від джерела живлення до електроприймачів приведені в таблиці 8.4.

Таблиця 8.4 – Дані до задачі 8.4

а) $P_{2i} = 2,8 \text{ кВт}; \cos \varphi = 0,85; \Delta u = 2,0\%; \eta = 0,8;$								
i	1	2	3	4	5	6	7	8
$L_i, \text{ м}$	10	13	16	20	22	24	26	28
б) $P_{2i} = 4,0 \text{ кВт}; \cos \varphi = 0,8; \Delta u = 2,0\%; \eta = 0,85;$								
i	1	2	3	4	5	6	7	8
$L_i, \text{ м}$	6	9	12	15	18	21	24	27
в) $P_{2i} = 1,7 \text{ кВт}; \cos \varphi = 0,75; \Delta u = 2,0\%; \eta = 0,7;$								
i	1	2	3	4	5	6	7	8
$L_i, \text{ м}$	8	12	16	20	24	28	32	36
г) $P_{2i} = 2,0 \text{ кВт}; \cos \varphi = 0,6; \Delta u = 2,0\%; \eta = 0,9;$								
i	1	2	3	4	5	6	7	8
$L_i, \text{ м}$	10	12	18	20	23	26	30	40
д) $P_{2i} = 4,0 \text{ кВт}; \cos \varphi = 0,85; \Delta u = 1,5\%; \eta = 0,8;$								
i	1	2	3	4	5	6	7	8
$L_i, \text{ м}$	10	13	16	20	22	24	26	28
е) $P_{2i} = 1,5 \text{ кВт}; \cos \varphi = 0,8; \Delta u = 1,5\%; \eta = 0,85;$								
i	1	2	3	4	5	6	7	8
$L_i, \text{ м}$	6	9	12	15	18	21	24	27
ж) $P_{2i} = 2,8 \text{ кВт}; \cos \varphi = 0,75; \Delta u = 1,0\%; \eta = 0,7;$								
i	1	2	3	4	5	6	7	8
$L_i, \text{ м}$	8	12	16	20	24	28	32	36
з) $P_{2i} = 3,0 \text{ кВт}; \cos \varphi = 0,6; \Delta u = 1,0\%; \eta = 0,9;$								
i	1	2	3	4	5	6		
$L_i, \text{ м}$	10	12	18	20	23	26		

Додаток Д1

Тривалий допустимий струм $I_{\text{доп}}$ для проводів з гумовою і пластмасовою ізоляцією на напругу до 1 кВ з алюмінієвими (числівник) і мідними (знаменник) жилами при температурі навколишнього повітря 25⁰С

АПР, АПРТО, АПРВ, АПВ, ПР, ПРТО, ПРГ, ПРВ, ПВ, ПГВ, ПРГВ						
Переріз проводу, мм ²	Допустимий струм $I_{\text{доп}}$, в залежності від способу прокладки					
	відкрито	в сталених трубах при кількості проводів в трубі				
	–	2	3	4	5 – 6	7 – 8
1,0	– /17	– /16	– /15	–/14	–	–
1,2	– /20	–/18	–/16	–/15	–	–
1,5	– /23	–/19	–/17	–/16	–/15	–/14
2,0	21/26	19/24	18/22	15/20	12/17	11/16
2,5	24/30	20/27	18/25	19/25	15/20	14/19
3,0	27/34	24/32	22/28	21/26	18/22	17/21
4,0	32/41	28/38	28/35	23/30	22/28	21/26
5,0	36/46	32/42	30/39	27/34	24/33	22/28
6,9	39/50	36/46	32/42	30/40	26/34	24/31
8,0	46/62	43/54	40/51	37/46	30/40	29/38
10,0	60/80	50/70	47/60	39/50	38/48	35/45
16,0	75/100	60/85	60/80	55/75	48/64	45/60
25,0	105/140	85/115	80/100	70/90	65/80	60/75
35,0	130/170	100/135	95/125	85/115	75/100	70/95
50,0	165/215	140/185	130/170	120/150	105/135	95/125
70,0	210/270	175/225	165/210	140/185	130/165	125/155
95,0	255/330	215/275	200/255	175/225	–	–

Список літератури

1. Правила устройства электроустановок /Минэнерго СССР.–6-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Будіщев М. С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. Підручник. – Львів: Афіша, 2001. – 424с.
3. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка і мікросхемотехніка: Під ред.. А. Г. Соскова. Вид. 2-е, виправл. і доповн.– Харків: ХДАМГ, 2003 – 281с.
4. Теорія електропривода: Підручник/ М. Г. Попович, М.Г. Борисик, В.А. Гаврилюк та ін. За ред. М.Г. Поповича. - К.: Вища шк., 1993. -454 с.
5. Клауснітцер Г. Введение в электротехнику: Пер. С нем. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 480с.
6. Руденко В. С., Ромашко В. Я., Трифонюк В. В. Промислова електроніка – К: Либідь, 1993. – 432 с.
7. Веников В.А., Путятин Е.В. Введение в специальность.: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1978 – 294 с.
8. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. Учеб. для вузов. – 6-е изд. пе-рераб. – М.: Высш. шк., 1999 – 542 с.
9. Сборник задач по электротехнике и основам электроники: Учеб. пособие для неэлектротехн. Спец. Вузов/В.Г. Герасимов, Х.Э. Зайдель, В.В. Коген-Далин и др.; Под ред. В.Г.Герасимова. – 4-е изд., перераб. И доп.– М.: Высш. шк., 1987. – 288 с.; ил.
10. Рогачов О.І. Конспект лекцій з курсу «Вступ до спеціальності» (для студентів 1 курсу денної та заочної форм навчання за напрямом 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання»)/ О. І. Рогачов, В. М. Гаряжа; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва – Х.:ХНАМГ, 2011.– 99 с.

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять
з курсу

ВСТУП ДО СПЕЦІАЛЬНОСТІ

*(для студентів 1 курсу денної форми навчання за напрямом
підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології)*

Укладачі: **ГАРЯЖА** Василь Миколайович
КАПУСТІН Геннадій Валентинович

Відповідальний за випуск: *доц. В. С. Швець*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання: *І. В. Волосожарова*

План 2014, поз. 191М

Підп. до друку 22.12.2014
Друк на ризографі
Тираж 50 пр.

Формат 60 x 84/16
Ум. друк. арк. 2,6
Зам. №

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 4705 від 28.03.2014 р.